

~~31-04/4/001~~

31-04/4/001

Untersuchungen über das Verhalten der Biegedruckzone
von Stahlbetonbalken und Rippendecken
bei dreiseitigem Feuerangriff

B e r i c h t

erstattet von

Dipl.-Ing. J. Wesche

Dezember 1974

BIBLIOTHEK
Institut für Sanitär-, K.- u. W.- u. Brandschutz
der Technischen Universität Braunschweig
Postfachstraße 32
D-3300 Braunschweig

Die Untersuchungen wurden im Auftrage des Bundesministers
für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau, Bonn - Bad Godes-
berg (Az.: I 7 - 81 07 05 - 116/1) durchgeführt.

1. Allgemeines; Zweck der Untersuchungen	1
2. Versuchsplanung und Vorbereitung	4
2.1. Versuchskörper	4
2.1.1. Baustoffe	6
2.1.2. Querschnitte und statisches System	7
2.1.3. Meßquerschnitte	10
2.1.4. Lagerung und Trocknung	10
2.2. Versuchsaufbau und -durchführung	11
2.2.1. Brandraum und Beheizung	11
2.2.2. Einbau und Belastung	11
2.2.3. Meßprogramm	12
2.2.4. Sonstige Beobachtungen	13
3. Versuchsergebnisse	13
3.1. Temperatur-Zeit-Verläufe	13
3.2. Vertikale Durchbiegung	14
3.3. Horizontale Verschiebung und Endverdrehung	15
3.4. Dehnung der Biegezugbewehrung	16
3.5. Sonstige Beobachtungen	16
4. Auswertung der Versuchsergebnisse	23
4.1. Vertikalverformungen	23
4.2. Horizontalverschiebungen	24
4.3. Spannungsverteilung über den Querschnitt in Abhängigkeit von der Branddauer	25
4.4. Rechnerische Ermittlung der Spannungsverteilung unter Berücksichtigung einer mittleren Temperaturkurve	36
4.5. Betonabplatzungen	39
4.6. Vorschlag von Mindestabmessungen der Biegedruckzone für die Einstufung in bestimmte Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102	40
5. Zusammenfassung und Wertung der Versuchsergebnisse	43
Literatur	45

1. Allgemeines; Zweck der Untersuchungen; früher durchgeführte Versuche

Die Feuerwiderstandsdauer von Stahlbetonkonstruktionen wird in der Mehrzahl der Fälle begrenzt durch das Versagen der Bewehrung. Das gilt im wesentlichen auch für statisch unbestimmte Systeme wie schlaffbewehrte oder vorgespannte Durchlaufträger. Wenn allerdings im Bereich von Zwischenauflagern oder von Rahmenecken, die der direkten Beflammung ausgesetzte Biegedruckzone bereits im Gebrauchszustand hochausgenutzt wird und im Brandfall - durch Momentenumlagerungen bedingt - ein weiteres Ansteigen der Biegedruckkraft zu erwarten ist, kann auch ein vorzeitiges Versagen infolge Druckbruches nicht ausgeschlossen werden. Gefahren dieser Art erhöhen sich mit abnehmenden Querschnittsabmessungen der beflammten Biegedruckzone.

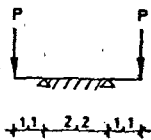
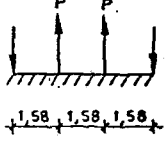

Im Auftrage des Bundesministers für Raumordnung, Bauwesen und Städtebau wurden mehrere Forschungsprogramme zum Studium des Brandverhaltens der Biegedruckzone durchgeführt, um Mindestquerschnitte festzulegen, die bei direkter Wärmebeanspruchung der Biegedruckzone eine bestimmte Feuerwiderstandszeit mit hinreichender Sicherheit gewährleisten.

Die bisher vorliegenden experimentellen Untersuchungen über die Veränderung der Druckfestigkeit und des E-Moduls von Beton u. a. [1], [2] und [3] haben noch keine umfassend gesicherten Werte erbracht, neueste rechnerische Untersuchungen über das Brandverhalten der Biegedruckzone [4] müssen durch Brandversuche - in Anlehnung an DIN 4102, Brandverhalten von Baustoffen und Bauteilen - überprüft werden.

Erste Versuche wurden bereits in den Jahren 1967 und 1968 im Rahmen der Untersuchungen von Schutzbauten durchgeführt. Dabei sollte die Brandbelastung, hervorgerufen durch offene Brände und schwelende Trümmerkegel, auf den Stahlbetonbauteilen simuliert werden, d. h. man mußte die Biegedruckzone im Bereich der Felder beheizen [5].

Ein im Anschluß daran an das Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau vergebener Forschungsauftrag hat in einer 3-teiligen Versuchsreihe erste Anhaltswerte für die gesuchten Mindestquerschnitte der Biegedruckzone gegeben. Die Versuchsergebnisse erbrachten außerdem wichtige Erfahrungen hinsichtlich einer brandschutztechnisch zweckmäßigen Querschnittsgestaltung und führten zu einer Verbesserung des bis dahin verwendeten Meßverfahrens. Planung, Durchführung und Ergebnisse dieser Versuchsreihe sind in einem "vorläufigen Abschlußbericht" [6] beschrieben.

In der folgenden Tafel 1 sind diese Versuchsergebnisse zusammengefaßt, um so gemeinsam mit den neuen Werten beurteilt werden zu können.

Bezeichnung	System	Querschnitt	Zugbewehrung [cm ²]	Stahlzugspannung [σ _e kp/cm ²]	Betongüte	Betonrandspannung [σ _b kp/cm ²]	Druckbewehrung	Bruchzeit [min]	Art des Bruches und Beobachtungen
1		Platten b/d = 150/20 cm	6 Ø 12 +2 Ø 10 St.IIIa	2400	Beton B 225 σ _{w28} = 257 kp/cm ²	50	R 513 + R 377	> 240	Oberflächenabpl. < 0,15 m ²
2			6 Ø 20 +2 Ø 16 St.IIIa			100	R 317	243	Gesamte Plattenfläche abgeplatzt. Druckbe- wehrung ausgeknickt.
3			13 Ø 20 +2 Ø 12 St.IIIa			150	R 185	142	Gesamte Plattenfläche abgeplatzt. Druckbe- wehrung ausgeknickt.
4		Platte b/d = 150/14 cm	6 Ø 16 +4 Ø 12 St.IIIa			100	R 513	142	Gesamte Plattenfläche abgeplatzt. Druckbe- wehrung ausgeknickt.
1		Platten b/d = 100/20 cm	6 Ø 14 +2 Ø 8 St.IIIb	2400	Beton B 225 σ _{w28} = 239 kp/cm ²	80	keine	168 (Zuganker herausge- zogen)	Großflächige Abplatzun- gen in der Druckzone (3,2 % Feuchte)
2				2400		80		> 240	Keine Abplatzungen (2,2 % Feuchte)
3				4500		151		56 (Zuganker herausge- zogen)	Großflächige Abplatzun- gen in der Druckzone (3,2 % Feuchte)
4			13 Ø 14 St.IIIb	2400		120		> 240	Keine Abplatzungen (2,2 % Feuchte)
1		Plattenbalken b ₀ /b/d ₀ /d = 8/38/28/10	1,6	650	B 225 σ _{w28} =227	26,5	Konstruktion 2 Ø 6 III in allen Balken	> 180	Steg nach 180 min völ- lig zermürbt. Die ge- schützte Platte be- stimmt das Tragverhal- ten der Plattenbalken- konstruktion.
2			1,6	2080	B 225 σ _{w28} =232	85		> 180	
3		Plattenbalken b ₀ /b/d ₀ /d = 10/40/32/10	2,3	2100	B 225 σ _{w28} =227	85		80	78.Min. Steg im Bereich d.Krafteinleitung zer- stört. Δf/Δt > Δf/Δt _{zul} Eindeutig Druckbruch des Steges.
4			3,4	900	B 225 σ _{w28} =232	47,5		> 180	v.d.90.Min. an Durch- biegungsgeschwindigk. ~ 1 mm/min. Steg weit- gehend zermürbt. Trag- reserven in der Platte.
5			6,0	1580	B 225 σ _{w28} =218	120		65	Durch d.hohe Auslastg. liegt d.Stahl schnell im Fließbereich (~ 50. Min.).Durch weiteres Aufreißen d.Querschnitt- es u.Überbelastung d. Druckzone — Druckbr.
6		Plattenbalken b ₀ /b/d ₀ /d = 12/42/36/10	6,0	1130	B 225 σ _{w28} =227	72,5		71	Eindeutig Versagen d. Biegedruckzone in Feldmitte.
7			9,4	750	B 225 σ _{w28} =232	64		> 180	V.d.120.Min.an Durch- biegungsgeschwindigk. ~ 2mm/min. Tragreserv. auch hier i.d.Platte.
8		Plattenbalken b ₀ /b/d ₀ /d = 15/45/42/10	12,6	790	B 225 σ _{w28} =218	64		113	Versagen d.Konstruktion Bruch d.Biegedruckzone
8a			38,2	680	B 600 σ _{w28} =585	121		120	Versagen d.Konstruktion Bruch d.Biegedruckzone
9		Plattenbalken b ₀ /b/d ₀ /d = 20/60/56/14	12,6	1415	B 225 σ _{w28} =218	75,3		130	Versagen d.Konstruktion Bruch d.Biegedruckzone
10			21,2	867	B 225 σ _{w28} =210	65		154	Versagen d.Konstruktion Bruch d.Biegedruckzone

2. Versuchsplanung und -vorbereitung der neuen Versuchsreihe

Die Auswertung der bisher durchgeführten Versuche beeinflusste die Planung der vorliegenden Versuchsreihe in wesentlichen Punkten.

Abweichend von der bisherigen Planung wurden anstelle von Plattenbalken Rechteckquerschnitte gewählt, um zu vermeiden, daß bei extremer Spannungsumlagerung - besonders bei Querschnitten mit geringer Höhe - die Platte Druckspannungen mit übernahm.

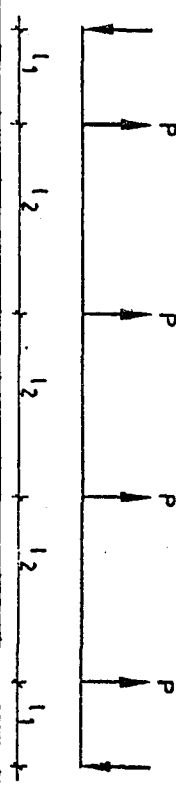
Die Belastung im Kaltzustand wurde so gewählt, daß die Biegedruckspannungen vom Betonquerschnitt im Gebrauchszustand gerade noch ohne Druckbewehrung aufgenommen werden konnten, d. h. bei der Bemessung nach dem k_h -Verfahren wurde der Richtwert k_h^* in Anlehnung an die Grundlagen nach DIN 1045 neu erreicht. Durch Laststeigerung in den ersten 30 Minuten der Brandbeanspruchung wurde ein Zusatz-Moment eingeleitet in einer Größe, wie sie sich bei Durchlaufkonstruktionen durch Überlagerung der Gebrauchsmomente mit den Temperaturzwängungsmomenten einstellt, d. h. die Auswirkung der Schnittgrößenumlagerung bei statisch unbestimmten Systemen infolge Brandbeanspruchung auf die Biegedruckzone wurde durch Laststeigerung am statisch bestimmten Versuchssystem simuliert.

Durch die Laststeigerung über die rechnerische Gebrauchslast hinaus wurden gegenüber den früheren Versuchen höhere Belastungen erforderlich, die von 4 Zugpressen aufgebracht werden mußten.

2.1. Versuchskörper

Insgesamt wurden in dieser 2. Versuchsreihe 12 Balken mit Variationen in den Abmessungen, dem Seitenverhältnis und der Betongüte hergestellt. Eine Übersicht des Versuchsprogrammes ist in Tafel 2 wiedergegeben.

T a f e l 2: Versuchsprogramm

Bezeichnung	System	l_1 [cm] l_2 [cm]	Querschnitt b/d [cm]	$b/d_F =$ Breite/ beflammte Höhe	Zug- bewehrung [cm ²]	Stahlzug- spannung σ_e [kp/cm ²]	Betongüte	Beton- druck- spannung	Druck- bewehrung		
1		59 119	10/30	1 : 2	6,16	Stahlzugspannungen s. Tafel 5	Bn 250 $\beta_{w28} =$ 300 kp/cm ²	Betondruckspannungen s. Tafel 5	Konstr. 2 Ø 6 III		
2			15/40		12,56						
3		117,5 80	20/55		21,24		Bn 350 $\beta_{w28} =$ 450 kp/cm ²				
4			10/30		4,52						
5		59 119	10/30	1 : 4	7,1		Bn 450 $\beta_{w28} = 500$				
6			10/55		9,24						
7		15/40	1 : 2	1 : 2	10,16		Bn 350 $\beta_{w28} =$ 435 kp/cm ²				
8			1 : 3		15,2						
9		20/55	1 : 2	1 : 2	19,8						
10			1 : 2								
11		125	15/60	1 : 3	15,2						
12		75	20/55	1 : 2	19,8						

2.1.1 Baustoffe

Der Beton für die Versuchskörper wurde für 11 Balken von einem Betonwerk bezogen und sollte der Güteklasse Bn 250 bzw. Bn 350 entsprechen. Für einen Balken wurde Beton der Sollgüte Bn 450 selbst hergestellt. In der folgenden Tafel 3 sind die Betonzusammensetzung und das planmäßige Wasser-zementverhältnis W/Z für die verschiedenen Versuchskörper zusammengestellt.

T a f e l 3: Betonzusammensetzung

Versuchskörper	Zuschlagstoffe in %				Bindemittel		Wasser-Zement-Faktor W/Z	β_{w28}
	0 - 3	3 - 7	7 - 15	15 - 30	Art	Menge [kg/m ³]		
1 - 4	40	15	45	0	PZ 350	350	~ 0,7	300
5, 6	40	15	45	0	PZ 350	350	~ 0,5	450
7, 9 - 12	40	15	45	0	PZ 350	370	~ 0,55	435
8	33	22	45	0	PZ 450	350	= 0,57	500

Als Bewehrung für die Balken wurde Betonstahl BSt 42/50 RU (St IIIa) und BSt 42/50 RK (St IIIb) verwendet. In der folgenden Tafel 4 sind die für die einzelnen Bewehrungsstähle über Spannungs-Dehnungs-Diagramme ermittelten Streck- und Bruchgrenzen (β_s und β_{Br}) angegeben.

T a f e l 4: Festigkeit der Stahleinlagen

Versuchskörper	Ø Stahl [mm]		β_s Streckgrenze [kp/cm ²]	β_{Br} Bruchgrenze [kp/cm ²]
1	14	RK	4300	~ 5200
2	14	RK	4300	~ 5200
3	20	RK	4900	~ 5600
4	20	RK	4900	~ 5600
5	26	RK	4550	~ 5600
6	26	RK	4550	~ 5600
7	12	RU	6300	~ 7900
8	14 + 16	RK	4600	~ 5150
9	14	RK	4300	~ 5450
10	18	RK	5150	~ 5570
11	22	RK	4800	~ 5550
12	24 + 26	RK	4650	~ 5600

2.1.2 Querschnitte + statisches System

Als Prüfkörper wurden Rechteckbalken mit einem definierten beflamten Seitenverhältnis b/d_F hergestellt, deren Stützweite $l = 4,75$ m betrug. Der obere Teil der Rechteckbalken (d_o) wurde seitlich durch aufgeklebte Vermiculiteplatten geschützt, um ein zu starkes Aufheizen der Zugbewehrung und damit ein vorzeitiges Versagen des Balkens durch Überschreiten der kritischen Stahltemperatur zu verhindern.

Die Beflammung erfolgte von drei Seiten; die Balkenoberseite wurde abgedeckt.

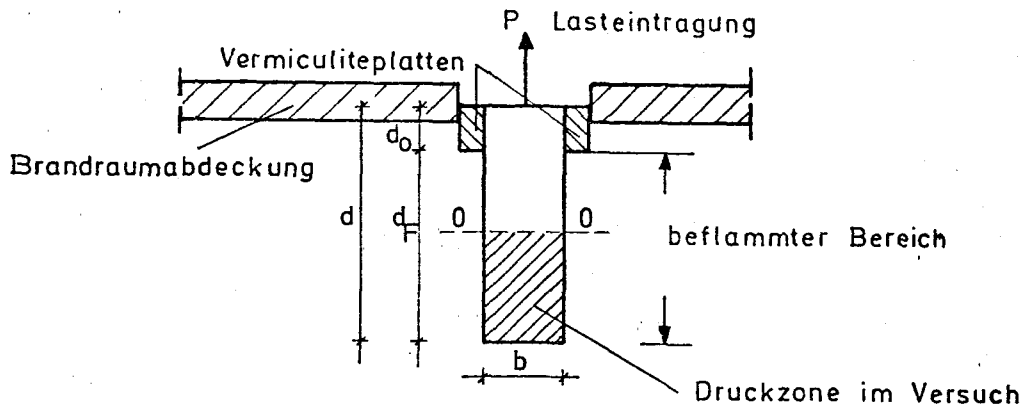


Bild 1: Querschnittsabmessungen

Weitere Angaben zum statischen System s. Tafel 2 (Seite 5).

In der folgenden Tafel 5 werden die wesentlichen Bemessungsgrößen (Belastung, Schnittkräfte, Spannungen und Bewehrungsquerschnitte) zusammengestellt.

T a f e l 5
(siehe Seite 9)

Die Spalten 1 - 11 geben die wichtigsten Werte für die Bemessung im Gebrauchszustand an. Die Belastung P_0 wurde so gewählt, daß der Grenzdehnungszustand $\epsilon_e = 3,0 \text{ ‰} / \epsilon_1 = - 3,5 \text{ ‰}$ erreicht wird und der Querschnitt ohne Einlegen von Druckbewehrung wirtschaftlich zu bemessen ist.

Für den Spannungsnachweis im Gebrauchszustand werden die Ansätze nach Luetkens [12] verwendet, die für elastisches Verhalten von Stahl und Beton gelten ($n = E_e / E_b = 10$).

In den Spalten 12 und 13 sind die erhöhte äußere Belastung P_{\max} und das zugehörige Moment aufgetragen, durch welche die Schnittgrößenumlagerung bei statisch unbestimmten Systemen infolge Brandbeanspruchung simuliert wurde (s. Abschnitt 2). Die erhöhten Werte für P_{\max} bzw. M_{\max} entsprechen dem 1,75-fachen der Werte P_0 und M_0 des Gebrauchszustandes. Die zu Beginn des Brandversuchs einwirkenden Lasten P_0 wurden während des Brandversuchs auf P_{\max} gesteigert.

T a f e l 5: Schnittgrößen und Bemessung

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Versuchs- körper	Belastung		Schnitt- größen		Spannungen				Bewehrung		P _{max} [Mp]	M _{max} [Mp/m]
	g [Mp/m]	P ₀ [Mp]	M ₀ [Mp/m]	Q ₀ [Mp]	σ _e [kp/cm ²]	τ ₀ [kp/cm ²]	σ _b β _w [kp/cm ²]	α _b /β _w	F _e	F _T		
1	0,075	1,02 (t = 15min)	2,20	1,86	1550	7,9	150/340	0,44	4 Ø 14 (6,16 cm ²)	Ø 6 ^I e = 13 cm bzw. e = 20 cm	1,48	3,30
2	0,075	1,02	2,20	1,86	1550	7,9	150/340	0,44	4 Ø 14 (6,16 cm ²)	Ø 6 ^I e = 13 cm bzw. e = 20 cm	1,71	3,85
3	0,15	2,75	6,1	5,14	1670	11,0	164/340	0,48	4 Ø 20 (12,56 cm ²)	Ø 8 ^I e = 12 cm bzw. e = 24 cm	4,72	10,0
4	0,15	2,75	6,1	5,14	1670	11,0	164/340	0,48	4 Ø 20 (12,56 cm ²)	Ø 8 ^I e = 12 cm bzw. e = 24 cm	4,72	10,0
5	0,275	6,5	19,7	12,35	2250	14,0	205/480	0,43	4 Ø 26 (21,24 cm ²)	Ø 8 ^I e = 8,5 cm bzw. e = 20 cm	9,0	27,5
6	0,275	6,5	19,7	12,35	2250	14,0	205/480	0,43	4 Ø 26 (21,24 cm ²)	Ø 8 ^I e = 8,5 cm bzw. e = 20 cm	9,0	27,5
7	0,075	1,05	2,30	1,92	2300	9,3	192/450	0,43	4 Ø 12 (4,52 cm ²)	Ø 6 ^I e = 15 cm	1,75	3,93
8	0,075	1,5	3,35	2,84	2230	13,9	240/520	0,46	2 Ø 14 + 2 Ø 16 (7,1 cm ²)	Ø 6 ^I e = 15 cm 1 Ø 14	2,5	5,75
9	0,138	3,8	8,6	7,27	2270	18,8	188/450	0,42	6 Ø 14 (9,24 cm ²)	Ø 6 ^I e = 15 cm 2 Ø 14	6,2	14,2
10	0,15	2,95	6,6	5,54	2220	13,4	195/450	0,43	4 Ø 18 (10,16 cm ²)	Q 131 1 Ø 18	5,0	11,6
11	0,225	5,1	15,8	9,67	2230	14,6	183/450	0,41	4 Ø 22 (15,2 cm ²)	Q 131 2 Ø 22	8,8	27,7
12	0,275	5,75	18,0	10,85	2220	13,9	192/450	0,43	2 Ø 24 + 2 Ø 26 (19,8 cm ²)	Q 131 + 2 Ø 24	9,9	31,5

2.1.3 Meßquerschnitte

Zur Messung des Temperaturverlaufs über den Betonquerschnitt wurden in den Prüfkörpern 1 - 6 Fe-Konst. Thermoelemente in Form von vertikal und horizontal angeordneten Meßleitern einbetoniert. Bei den Prüfkörpern 7 - 12 wurden dagegen nur einzelne Fe-Konst.-Thermoelemente zur Überprüfung der erwarteten Temperaturverteilung vorgesehen.

Zur Messung der Stahldehnungen mittels mechanischen Setzdehnungsmessern wurden in Feldmitte an zwei Stäben der Biegezugbewehrung Meßmarken aus Messing aufgeklebt. Die Meßstreckenlänge betrug $l = 200$ mm. An jeder Dehnungsmeßstelle wurde zur Temperaturkompensation eine Temperaturmeßstelle zwischen den beiden Maßmarken an den obenliegenden Bewehrungsstäben angebracht.

2.1.4 Lagerung und Trocknung

Die Prüfkörper wurden in einer geschlossenen Halle gelagert, die annähernd das Normklima $20^{\circ}\text{C}/65\%$ r.F. aufwies. Die Lagerzeit betrug 6 - 8 Monate.

Die mittlere Betonfeuchtigkeit zum Zeitpunkt der Versuche wurde ermittelt durch Trocknung von Betonproben, die für die untersuchten Querschnitte repräsentativ waren, bei 105°C bis zur Gewichtskonstanz.

Die ermittelten Werte sind in der folgenden Tafel 6 aufgeführt.

T a f e l 6: Betonfeuchtigkeitsgehalt

Versuchskörper	1/2	3/4	5/6	7/9	8	10/11	12
Breite cm	10	15	20	10	10	15	20
Betonfeuchtig- keitsgehalt Gew.-%	3,08	3,37	3,73	3,15	2,9	3,30	3,55

Die Meßergebnisse zeigen, daß die Werte mit niedrigerem Feuchtigkeitsgehalt den dünneren Querschnitten zugeordnet sind, da diese bei gleichen Lagerungsbedingungen besser austrocknen als dickere Bauteile.

2.2 Versuchsaufbau und -durchführung

2.2.1 Brandraum und Beheizung

Die Versuchskörper wurden in einem Brandversuchsstand für Decken und Balken mit den lichten Abmessungen

$$L = 4,00 \text{ m}$$

$$B = 2,00 \text{ m}$$

$$H \approx 1,55 \text{ m}$$

untersucht. Die Versuchsbalken wurden mit einer freien Stützweite von $l = 4,75 \text{ m}$ aufgelegt; die Restfläche der Öffnung war mit Gasbetonplatten abgedeckt. Die innere Ausmauerung dreier Wände und des Bodens des Versuchsstandes bestand aus Hartschamotte, während die vierte - transportable - Wand aus Gasbetonsteinen bestand.

Die Beheizung nach der Einheitstemperaturkurve gemäß DIN 4102 erfolgte unter Verwendung von Heizöl EL nach DIN 52 603. Je 2 Ölbrenner, deren Flammenachsen parallel zur Balkenachse verliefen, waren an den gegenüberliegenden Schmalseiten des Brandraumes eingebaut. Die Flammenlänge betrug im allgemeinen 0,8 bis 1,0 m. Die Rauchgase wurden durch einen Abzug am Boden der Brandkammer abgesaugt.

2.2.2 Einbau und Belastung

Die Versuchsbalken mit einer Stützweite von $l = 4,75 \text{ m}$ wurden so eingebaut, daß sie auf $\geq 4,00 \text{ m}$ der vollen Brandbeanspruchung ausgesetzt werden konnten. Die Auflager lagen außerhalb des beheizten Raumes und waren durch geeignete Maßnahmen gegen unzulässige Wärmeeinwirkung geschützt.

Um zu erreichen, daß der Querschnittsbereich mit großen Biegedruckspannungen beheizt wird, mußten durch entsprechende Lastanordnung negative Momente im Feld aufgebaut werden.

In 4 einbetonierte Ankerhülsen (Abstände s. Tafel 2) wurden Stahlseilösen eingeschraubt, über die die Zugkräfte in die Balken eingeleitet wurden. Von den Auflagern unterhalb der Balken wurde eins fest und das andere verschieblich ausgebildet. Die abhebenden Kräfte wurden über hydraulische Pressen in die Rahmenkonstruktion des Belastungsgerüsts abgeleitet. Der Versuchsaufbau ist in Anlage 1 dargestellt.

Vor dem Brandversuch wurde die Gebrauchslast P_0 in mehreren Laststufen aufgebracht und die vertikale Verformung jeweils registriert. In den ersten 25 Minuten des Brandversuchs wurde dann durch Laststeigerung von P_0 auf P_{max} das Biegemoment auf das 1,75-fache des errechneten Gebrauchsmomentes erhöht. Das entspricht etwa dem Moment, das sich bei Durchlaufträgern im Bereich von Innenstützen durch die Überlagerung von Gebrauchsmoment und temperaturbedingtem Zwängungsmoment einstellt, wenn die Biegezugbewehrung in diesem Bereich im Gebrauchszustand mit $\beta_s/1,75$ ausgenutzt wird. Versuche an Durchlaufbalken haben ergeben, daß sich diese Überlagerungsmomente in den meisten Fällen bis etwa zur 30. Minute der Brandbeanspruchungszeit aufgebaut haben (s. auch [7] und [8]).

Bei den Versuchskörpern 1 - 6 wurde der kontinuierliche Momentenzuwachs durch eine einzige Laststeigerung in der 15. Minute ersetzt, während bei den Balken 7 - 12 der Momentenzuwachs durch Laststufen in 5-Minuten-Abständen besser angeglichen wurde.

2.2.3 Meßprogramm

Das Meßprogramm umfaßte folgende Aufgaben:

- a) Messung der Brandraumtemperaturen nach DIN 4102, 10 cm vom Prüfkörper entfernt, mit 6 NiCr-Ni-Thermoelementen, die in gleichmäßigem Abstand beiderseits des Balkens angeordnet wurden.
- b) Messung des Temperaturverlaufs über den Betonquerschnitt mit Fe-Konst.-Thermoelementen, die in vertikaler und horizontaler Richtung über den maximal beanspruchten Querschnitt (Feldmitte) verteilt waren.
- c) Messung der Stahltemperaturen an der Zugbewehrung in Feldmitte zur Kompensation der Wärmedehnung bei der Dehnungsmessung an den Bewehrungsstäben.

- d) Messung der Stahldehnung an zwei obenliegenden Bewehrungsstäben mit Hilfe eines mechanischen Setzdehnungsmessers (Meßlänge $l = 200$ mm).
- e) Messung der vertikalen Durchbiegung der Balken mit Hilfe dünner Stahl-Drähte, die von der jeweiligen Meßstelle zu mechanischen Rollenmeßgeräten geführt wurden.
- f) Messung der horizontalen Verschiebung und der Endverdrehung unter Verwendung von zwei dünnen Stahldrähten, die über Rollenmeßgeräte die horizontale Verschiebung zweier oberhalb des Balkens gelegenen, an einem T-Profil fixierten Punkte angaben (s. Bild 4).

2.2.4 Sonstige Beobachtungen

Das Verhalten der Stahlbetonbalken wurde während des Versuchs dauernd kontrolliert. Neben Feuchtigkeitsaustritt und Abplatzungen wurde besonders die Rißbildung beobachtet und mit den Spannungstrajektorien über dem gesamten Balken verglichen.

3. Versuchsergebnisse

3.1 Temperatur-Zeit-Verläufe

Der Temperatur-Zeit-Verlauf im Brandraum entsprach bei allen Versuchen der Einheitstemperaturkurve nach DIN 4102. Geringe Abweichungen von der Sollkurve lagen im Toleranzbereich. Auf eine Wiedergabe der Temperatur-Zeit-Verläufe wurde deshalb verzichtet.

Auch der Temperatur-Zeit-Verlauf über den jeweiligen Betonquerschnitt zeigt gegenüber den in früheren Versuchen gewonnenen Ergebnissen keine wesentlichen Abweichungen. Es wurden daher nur für einige charakteristische Balkenquerschnitte Isothermendarstellungen zu bestimmten Zeitpunkten (30, 60 und 90 Minuten) und im Bruchzustand wiedergegeben, die die Ausgangsbasis für die zu ermittelnde temperaturabhängige Druckfestigkeit der Biegedruckzone darstellen (s. Anlage 6.1 - 6.13).

3.2 Vertikale Durchbiegung

In den Bildern 2 und 3 sind die Vertikaldurchbiegungen aufgetragen. Die Durchbiegung unter Eigengewicht wurde dabei gleich 0 gesetzt, die Durchbiegungen in Richtung der einwirkenden (Zug)-Kräfte P wurden nach rechts auf der Abzisse angetragen. Die Durchbiegungen zu Versuchsbeginn sind der Gebrauchslast P_0 zuzuordnen. Nach Versuchsbeginn nahm die Durchbiegung als Temperaturverformung zunächst zur Feuerseite hin - der Kraftrichtung entgegen - zu, kehrte um und stieg dann bis zum Versuchsende zu der dem Feuer abgekehrten Seite hin - in Kraftrichtung an, beeinflusst im wesentlichen durch die Laststeigerung von P_0 auf P_{\max} , durch die Abnahme der Biegesteifigkeit und durch Schwinden und Kriechen.

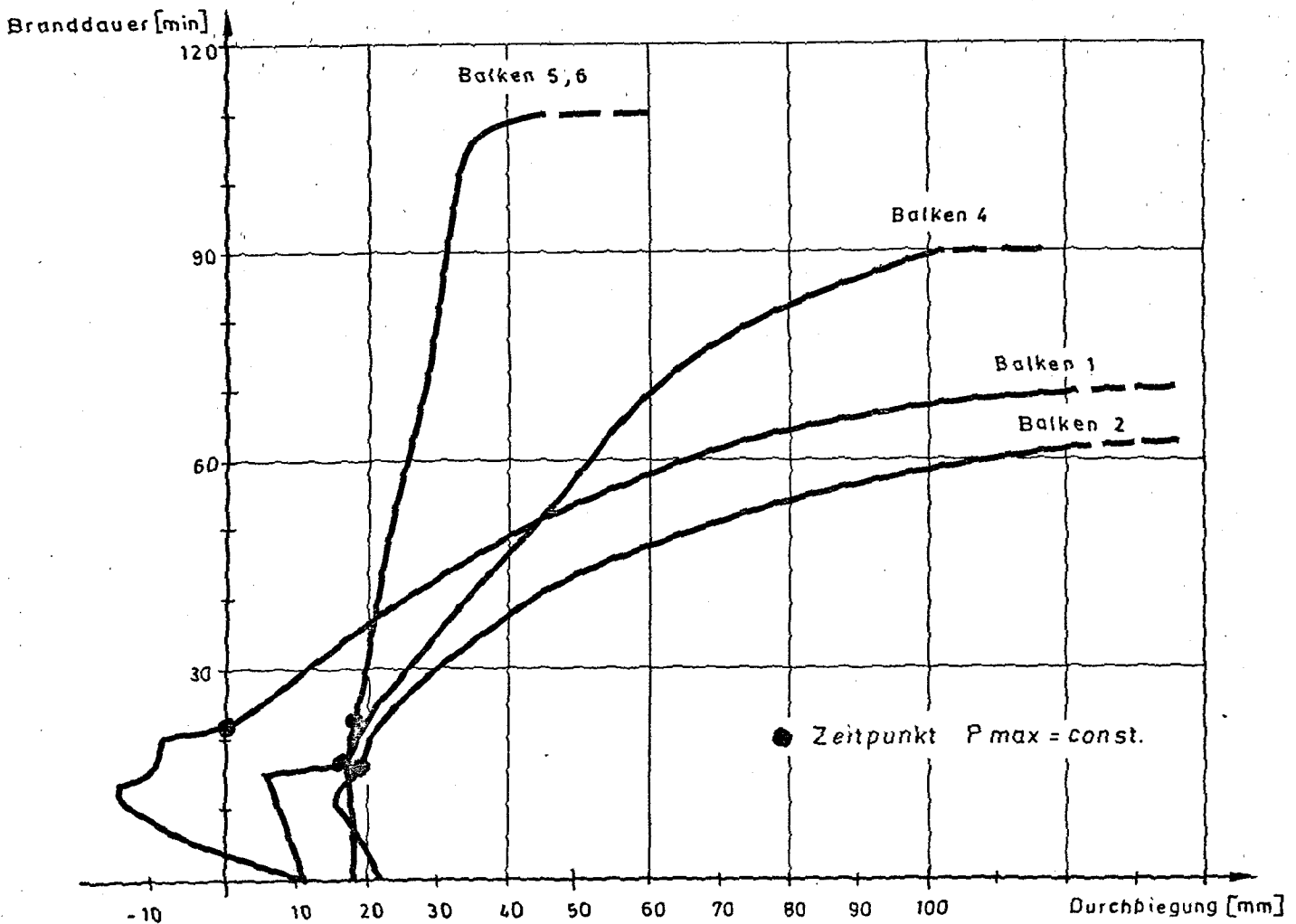


Bild 2: Gesamtverformung Balken 1 - 6

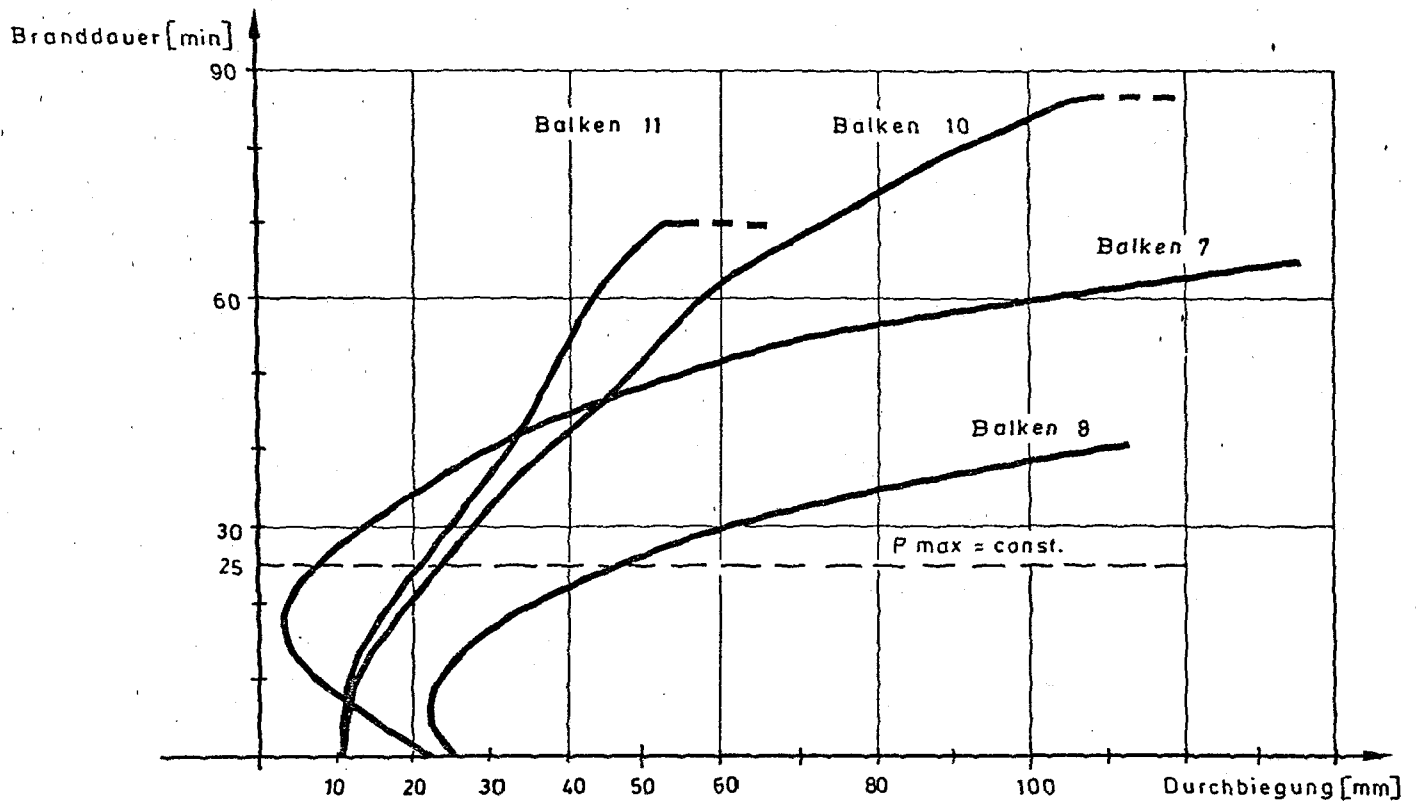


Bild 3: Gesamtverformung Balken 7, 8, 10 und 11

3.3 Horizontale Verschiebung und Endverdrehung

Als Verformungen am verschieblich gelagerten Balkenende wurden die Horizontalverschiebungen w_o und w_u gemessen. Daraus wurden nach Bild 4 der Endtangentialwinkel φ und die Horizontalverschiebung w der Balkenmittellinie errechnet.

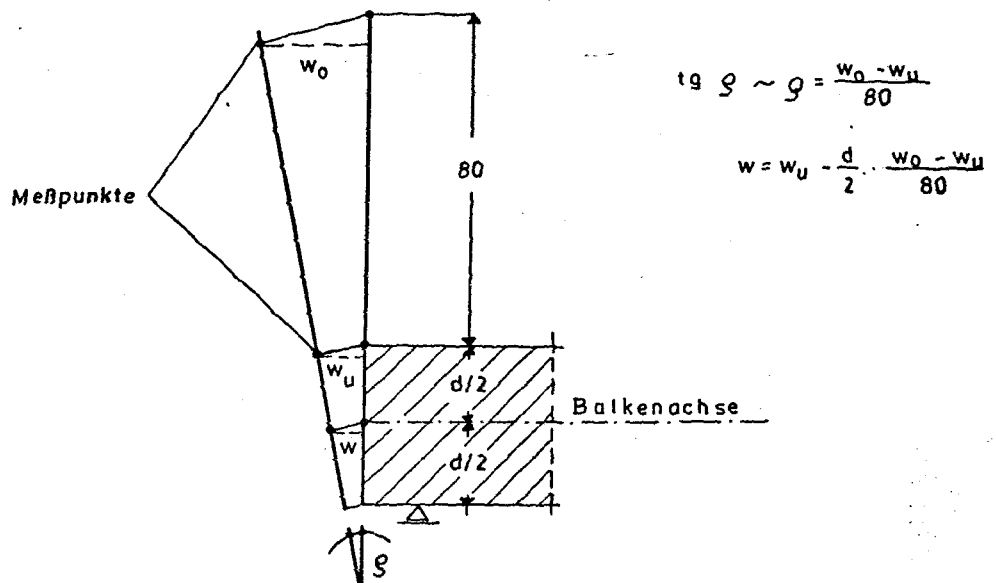


Bild 4: Systemskizze zur Ermittlung der Horizontalverschiebung und der Endverdrehung.

3.4. Dehnungen der Biegezugbewehrung

In den Anlagen 5.1 - 5.11 wurde die Dehnung der Biegezugbewehrung in Abhängigkeit von der Branddauer aufgetragen. Die Dehnungen infolge der Erwärmung des Bewehrungsstahls wurden bereits abgezogen.

Für die verwendete Bewehrung wurden die Spannungs-Dehnungs-Diagramme ermittelt und die zu den gemessenen Dehnungen zugeordneten Stahlspannungen abgelesen. Die ermittelte Streckgrenze β_s und die errechneten Stahlspannungen σ_e sind ebenfalls in diesen Anlagen wiedergegeben.

Über die errechnete Stahlspannung wird in Abschnitt 4.3 auf numerischem Wege die Spannungsverteilung über den Gesamtquerschnitt ermittelt, um Anhaltspunkte über Form und Größe der Biegedruckzone zu finden. Ausgangswerte für diese Näherungsberechnung sind die über den Stahlquerschnitt und die Spannung errechnete Stahllzugkraft Z und das aufgebrachte Biegemoment M , die auch in den Anlagen 5.1 - 5.11 dargestellt sind.

Alle Werte in diesen Anlagen sind in Abhängigkeit von der Branddauer bei Laststeigerung von P_0 ($t = 0$) auf P_{\max} ($t \leq 25$ min) aufgetragen.

3.5. Sonstige Beobachtungen

Alle Versuchskörper zeigten unter Belastung im Bereich der maximalen Zugspannungen Haarrisse, die sich unter Brandbeanspruchung erheblich vergrößerten. Besonders bei den breiten Balken ($b \geq 15$ cm) konnte etwa von der 15. - 20. Minute an ein starker Wasser- bzw. Wasserdampfaustritt aus den Rissen auf der Balkenoberseite beobachtet werden.

Im Bereich der Biegedruckzone wurden erst nach einer Branddauer von 40 bis 60 Minuten Risse festgestellt, die im wesentlichen parallel zu den Druckspannungstrajektorien verliefen. Zur besseren Veranschaulichung wurden die Spannungstrajektorien skizzenhaft in Anlage 4 dargestellt und die entscheidenden Risse von Balken 11 und 12 eingezeichnet.

Bei der Beurteilung der Bruchzustände nach den folgenden Bildern 5 - 13 ist zu berücksichtigen, daß diese Aufnahmen nur nach Entlasten und Erkalten der Bauteile möglich waren und ein Teil der Risse erst nach der Rückverformung entstand. Weitere Angaben über den Bruchverlauf und den Versagenszeitpunkt sind der Tafel 7 zu entnehmen.

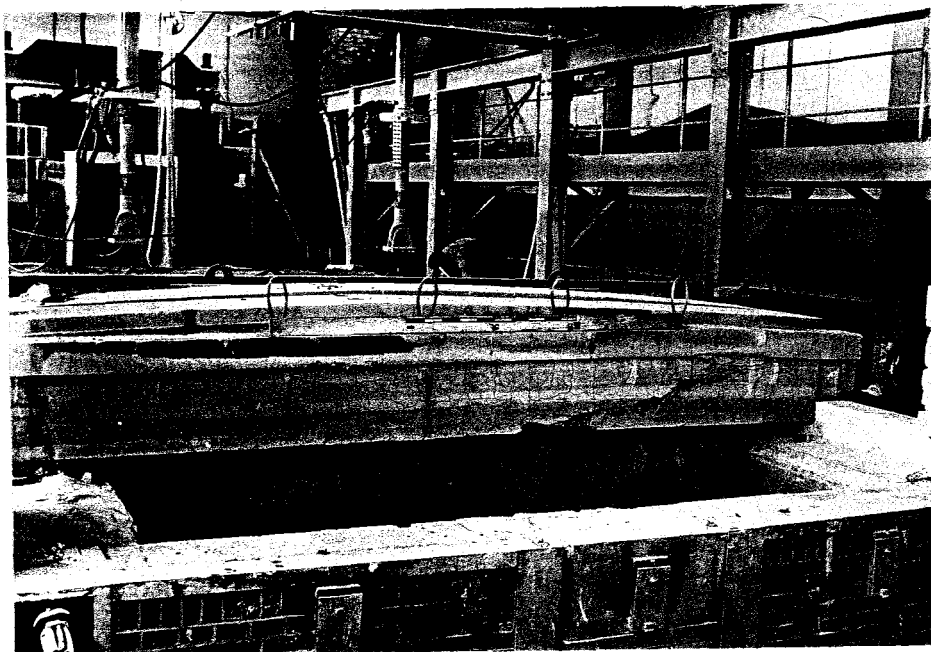


Bild 5: (Balken 6)

Gesamtansicht mit Bruchstelle im Bereich der maximalen Betondruckspannung (unmittelbar im Bereich des zweiten Krafteinleitungspunktes) Der schräg nach oben verlaufende Riß ist erst als Folge des Druckbruches aufgetreten.



Bild 6: (Balken 6)

Detailaufnahme der Bruchstelle mit dem schräg nach oben verlaufenden Riß

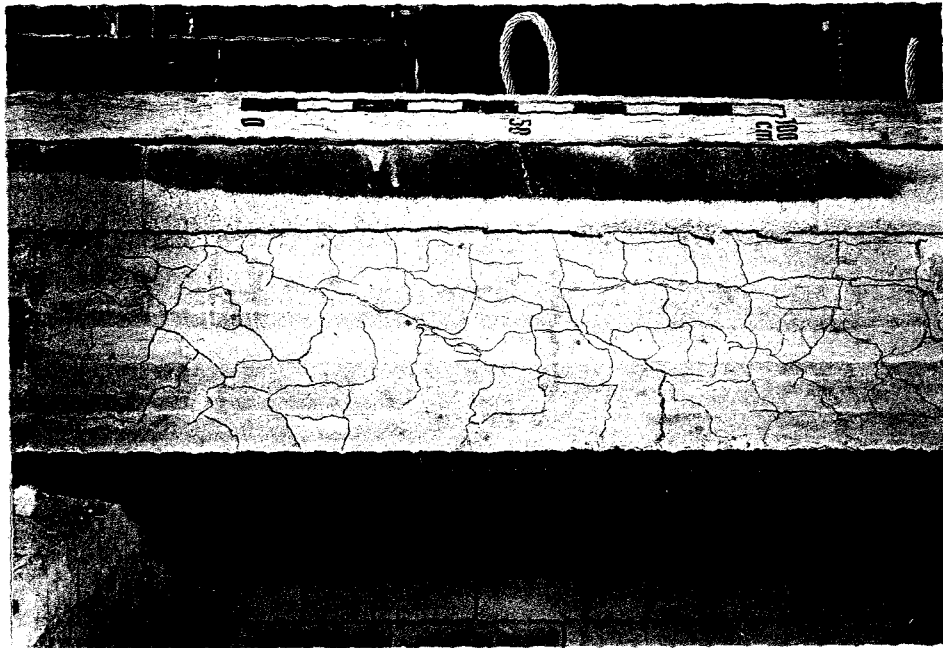


Bild 7: (Balken 6)
Rißbild im Auflagerbereich

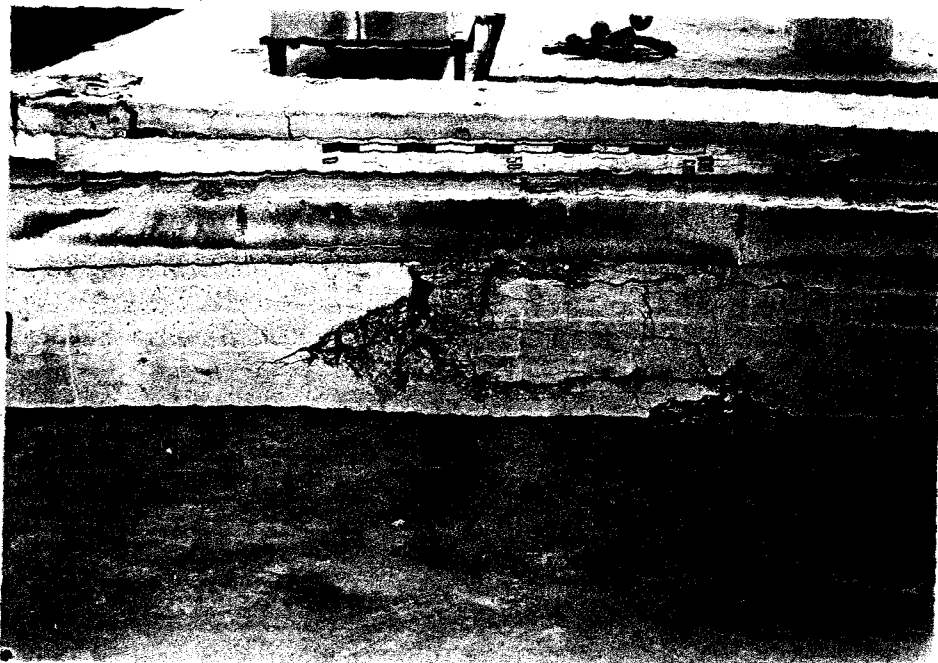


Bild 8: (Balken 5)
Detailaufnahme der Bruchstelle im Bereich der maximalen Beton-
druckspannungen, wobei als Primärbruch der Druckbruch an der
Balkenunterseite auftrat



Bild 9: (Balken 9)

Gesamtansicht des 10 cm breiten Balkens (Seitenverhältnis 1 : 4) mit großflächigen Abplatzungen, die zum Versagen der Konstruktion führten

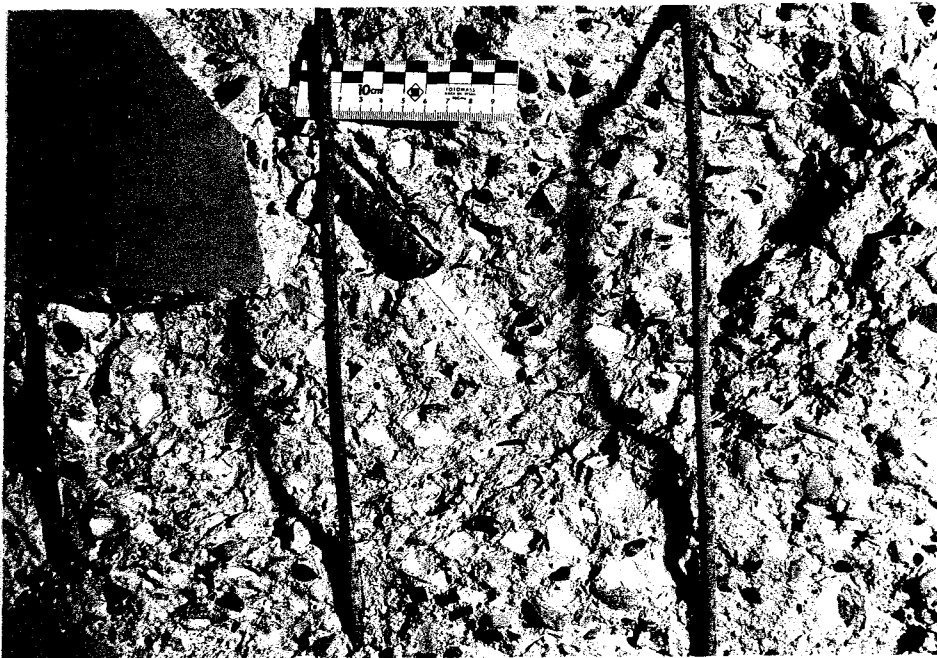


Bild 10: (Balken 9)

Detailaufnahme Abplatzung im Bereich der Verankerung der Zughülse. Gleitung des Verankerungsstabes deutlich erkennbar.

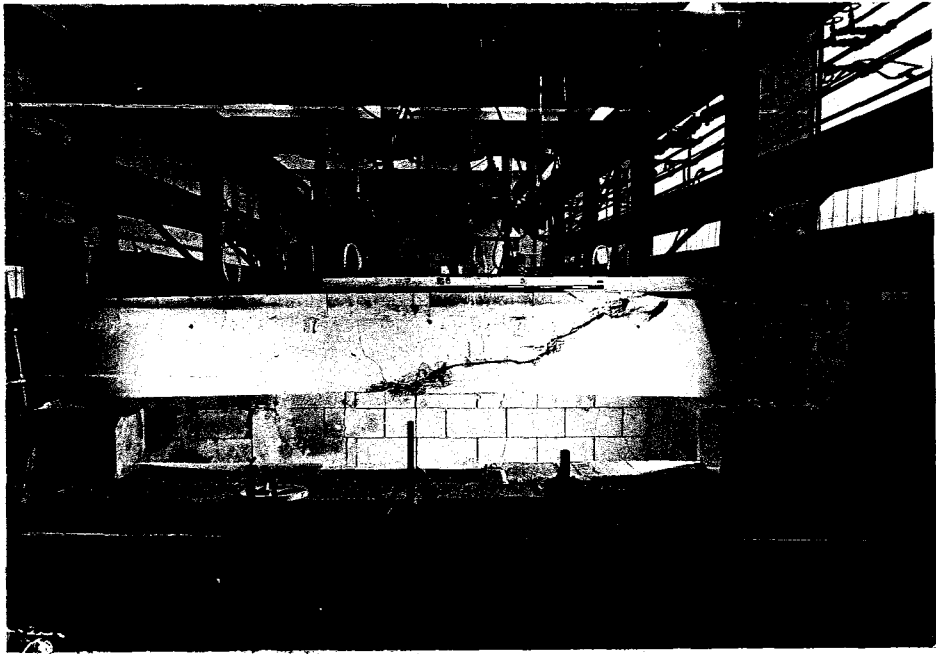


Bild 11: (Balken 11)

Gesamtansicht des Balkens. Als Primärbruch trat ein Versagen im Bereich der maximalen Betondruckspannung an der Balkenunterseite auf. Der Rißverlauf folgte dann etwa den Druckspannungstrajektorien (s. Anlage 4), wobei an der Balkenoberseite deutlich der Querkugeinfluß im Bereich der Krafteinleitung zu erkennen ist.

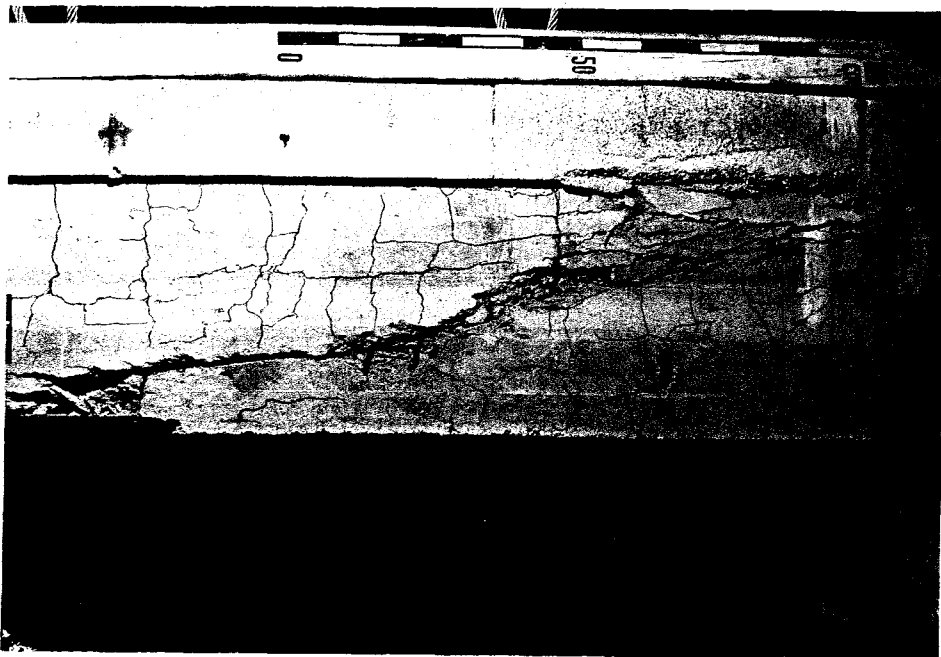


Bild 12: (Balken 11)

Detailaufnahme des Bruchbereiches

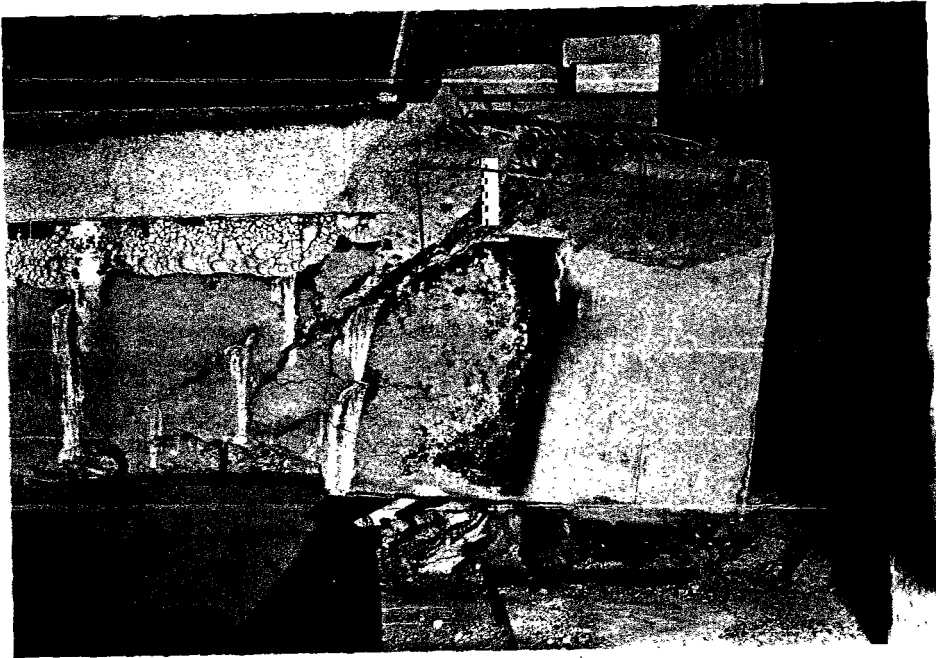


Bild 13: (Balken 12)

Detailaufnahme des Bruches im Auflagerbereich (Schubbruch)

Rißverlauf entsprechend den Spannungstrajektorien (s. Anlage 4)

Die Bügelbewehrung ist im Bereich des Bruches gerissen

T a f e l 7: Angaben über Versuchsbeobachtungen

Versuch	b	T _{Bruch}	Versuchsbeobachtung
-	[cm]	[min]	-
1	10	74	Von der 30. Minute an Risse im beflamten Steg und Zermürbung der Biegedruckzone. Ständige Zunahme der Durchbiegungsgeschwindigkeit, die zum Versagen der Konstruktion führte (Durchbiegung $\rightarrow \infty \leq 78$ Min.).
2	10	63	Durch eine höhere Belastung nahm die Durchbiegungsgeschwindigkeit etwas schneller zu als bei Balken 1 (Durchbiegung $\rightarrow \infty \leq 67$ Min.).
3	15	(60)	Von der 45. Minute an wurden Längsrisse an der Balkenunterseite und an den Seitenflächen des Balkens festgestellt. Der Balken versagte durch Kippen der Auflagerkonstruktion vorzeitig. Bis zum Versagen ist das Tragverhalten identisch mit Versuch 4.
4	15	90	Rißbildung s. Versuch 3. Erhöhte Zunahme der Durchbiegung von der 75. Minute an. In der 90. Minute plötzliches Versagen durch Bruch der Biegedruckzone.
5	20	108	Beide Balken zeigten bis unmittelbar vor dem Versuchsende eine etwa gleichbleibende Durchbiegungsgeschwindigkeit. Das Versagen erfolgte plötzlich durch Bruch der Biegedruckzone im Bereich der maximalen Druckspannungen zwischen den beiden mittleren Krafteinleitungspunkten. Von der 35. Minute an konnten Längsrisse an der Balkenunterseite und verschiedene Risse (s. auch Bild 5 - 8) an den Seitenflächen der Balken festgestellt werden.
6	20	113	
7	10	65	Verhalten entspricht den Balken 1 und 2. Auch hier ständige Zunahme der Durchbiegungsgeschwindigkeit ohne plötzliches Versagen der Konstruktion (Durchbiegung $\rightarrow \infty \leq 70$ Minuten).
8	10	38	Der Balken wurde bei Brandraumtemperaturen von ca. 200 °C 3 Stunden vorgetrocknet, um Abplatzungen zu verhindern. Im Brandversuch wurde der Balken schneller aufgeheizt, da die Verzögerung der Aufheizung im Bereich von 100 °C (Energie zur Verdampfung des Wassers) entfällt. Durch die größere äußere Belastung gegenüber dem Versuch 7 nahm die Verformung ebenfalls schneller zu, so daß insgesamt eine kürzere Feuerwiderstandsdauer zu erwarten war.
9	10	24	Durch großflächige Abplatzungen ($t \leq 5$ cm) wurde die Verankerung der Ankerhülse freigelegt und herausgezogen. Es war keine Krafteinleitung mehr möglich. Unabhängig vom Problem der Krafteinleitung wäre der Balken unmittelbar danach durch Bruch der Biegedruckzone zerstört worden, da im Bereich der maximalen Betondruckspannungen ein Restquerschnitt von stellenweise ≤ 5 cm Dicke übrigblieb.
10	15	87	Verhalten entspricht Versuch 4.
11	15	70	Entsprechend der größeren Steifigkeit geringere Durchbiegungsgeschwindigkeit als Balken 10. Plötzliches Versagen durch Bruch der Biegedruckzone in Feldmitte.
12	20	33	Versagen des Balkens durch Schubbruch in unmittelbarer Nähe des Auflagers. Die Stegbewehrung (Q 131) war gerissen.

Die Darstellung des Verformungsverlaufs über der Zeit (s. Bild 2 und 3) zeigt deutlich das unterschiedliche Tragverhalten der verschieden dicken Balken. Die Balken 1, 2, 7 und 8 zeigten große Verformungen bei ständig anwachsender Verformungsgeschwindigkeit. Der Versagenszeitpunkt war vorhersehbar. Die 15 cm dicken Balken 4, 10 und 11 zeigten bis 10 - 15 Minuten vor dem Bruch eine gleichbleibende Verformungsgeschwindigkeit und danach ein Anwachsen, jedoch in allen Fällen einen plötzlichen Bruch durch Versagen der Biegedruckzone. Noch ausgeprägter trat dieses plötzliche Versagen bei den 20 cm breiten Balken 5 und 6 auf, bei denen bis unmittelbar vor dem Bruch nur geringe Verformungen bei nahezu konstanter Durchbiegungsgeschwindigkeit registriert wurden.

4. Auswertung der Versuchsergebnisse

In der folgenden Auswertung werden im Rahmen der Ermittlung der Spannungsverteilung über den Gesamtquerschnitt Form und Lage der Biegedruckzone im Bruchzustand bestimmt. Außerdem werden Möglichkeiten zur Auswertung der Verformungsdaten aufgezeigt.

4.1. Vertikaldurchbiegungen

Die Meßwerte für die Vertikaldurchbiegungen setzen sich zusammen aus den Verformungen infolge äußerer Last, infolge der Temperaturverteilung über den Querschnitt - Temperaturdifferenzen zwischen oberem und unterem Rand - und infolge Abnahme der Biegesteifigkeit $E \cdot J$, wobei im letzten Anteil auch Schwind- und Kriecheinflüsse miteinfaßt werden sollen. Beim vorliegenden Versuchsaufbau sind die Verformungen infolge Last und Abnahme der Biegesteifigkeit gleichgerichtet, während die temperaturbedingten Verformungen entgegengesetzt gerichtet sind.

Im Rahmen dieser Arbeit wird auf eine Aufschlüsselung der Verformung in die einzelnen Anteile verzichtet, da einerseits ein erheblicher Rechenaufwand, insbesondere im Hinblick auf den Anteil aus Abnahme der Biegesteifigkeit und den Schwind- und Kriecheinflüssen, erforderlich wäre und andererseits eine Lösung dieses Problems nicht Gegenstand des mehr anwendungsbezogenen Forschungsauftrages ist.

4.2 Horizontalverschiebungen

Die gemessenen Horizontalverschiebungen setzen sich aus den Temperaturdehnungen und den Verkürzungen infolge vertikaler Durchbiegung sowie Warmkriechen und Schwinden der beheizten Druckzone zusammen. Die beiden ersten Komponenten lassen sich rechnerisch über die mittlere Temperatur im Querschnitt bzw. über die Systemgeometrie erfassen, der Einfluß von Schwinden und Kriechen wäre im Rahmen dieser Arbeit nur über den Vergleich der gemessenen Gesamtverschiebung mit den berechneten Teilkomponenten darzustellen.

$$w = w' + \Delta w = \Delta l_T - \Delta l_{S+K}$$

w = Gesamtverlängerung am Balkenende

w' = gemessene Verschiebung der Nulllinie

$\Delta w \approx \frac{8}{3} \frac{f^2}{l}$, wobei f = Durchbiegung in Balkenmitte und

l = Stützweite des Balkens ist.

Δl_T = Temperaturdehnung

Δl_{S+K} = Verkürzung infolge Schwindens und Kriechens.

Die Temperaturdehnung wird rechnerisch mit der Gleichung

$$\Delta l_T = \Delta T_m \cdot l_T \cdot \alpha_T$$

erfaßt. Dabei ist ΔT_m die mittlere Querschnittstemperatur - Auswertung der Isothermendarstellungen -, l_T die beheizte Prüfkörperlänge - entsprechend dem Versuchsaufbau etwa 4,50 m - und α_T der Ausdehnungskoeffizient - näherungsweise $1,0 \cdot 10^{-5}$ -.

Die Verkürzung infolge Schwindens + Kriechens könnte näherungsweise über die Gleichung

$$\Delta l_{S+K} = \Delta l_T - (w' + \Delta w)$$

ermittelt werden. Auf eine Auswertung wird jedoch aus den bereits unter Abschnitt 4.1 erwähnten Gründen verzichtet.

4.3 Spannungsverteilung über den Querschnitt in Abhängigkeit von der Branddauer

Entscheidend für die Beurteilung des Brandverhaltens der Biegedruckzone ist die Änderung der Spannungsverteilung über den maximal beanspruchten Balkenquerschnitt in Abhängigkeit von der Branddauer.

Bei der Ermittlung der Spannungsverteilung wird die Schnittkraftberechnung am statisch bestimmten System zugrunde gelegt. Innere Zwängungsspannungen infolge der nichtlinearen Temperaturverteilung über dem Querschnitt bleiben unberücksichtigt.

Im folgenden soll zunächst einmal anhand von Prinzipskizzen die mögliche Änderung der Spannungsverteilung in Abhängigkeit von der Ausnutzung und der Branddauer erläutert werden:

a) Spannungsverteilung zum Zeitpunkt $t = 0$

$$(M = M_u / \gamma)$$

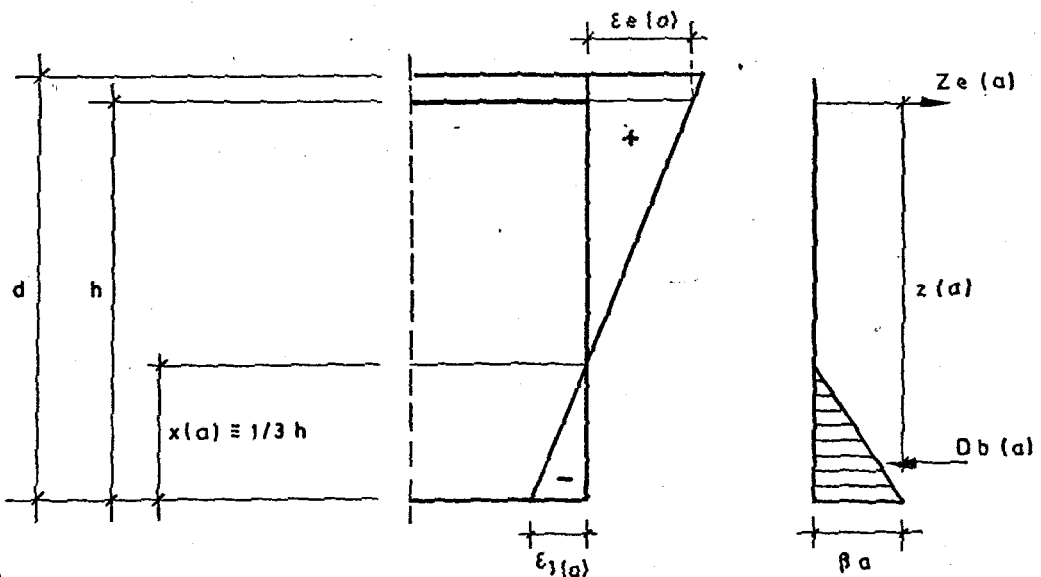
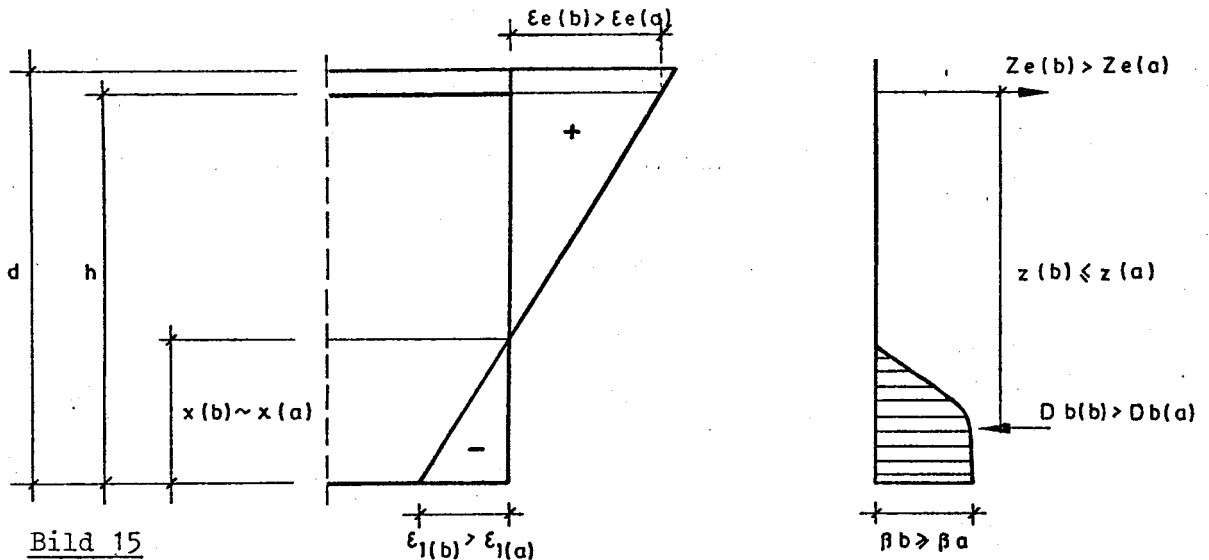


Bild 14

b) Spannungsverteilung zum Zeitpunkt $t = 0$

$$(M = M_u)$$

Diese Spannungsverteilung wird nur als Vergleichszustand angegeben.



Es wird angenommen, daß die Stahlspannung im Bereich der Fließgrenze liegt.

c) Spannungsverteilung zum Zeitpunkt $t = 25$ Minuten

$$(M \cong M_u)$$

Infolge der Aufheizung sind die Randschichten im Bereich der Biegedruckzone nicht mehr in der Lage, die vollen Druckspannungen aufzunehmen. Bei einer Berechnung können für die zulässigen Betondruckspannungen in Abhängigkeit von der Temperatur Werte nach [1] eingesetzt werden.

Ohne Veränderung der Schnittgrößen aus äußerer Last nimmt die Dehnung der Biegezugbewehrung zu. Das bedeutet: Zunahme der Biegezugkraft und Verkleinerung des Hebelarms der inneren Kräfte.

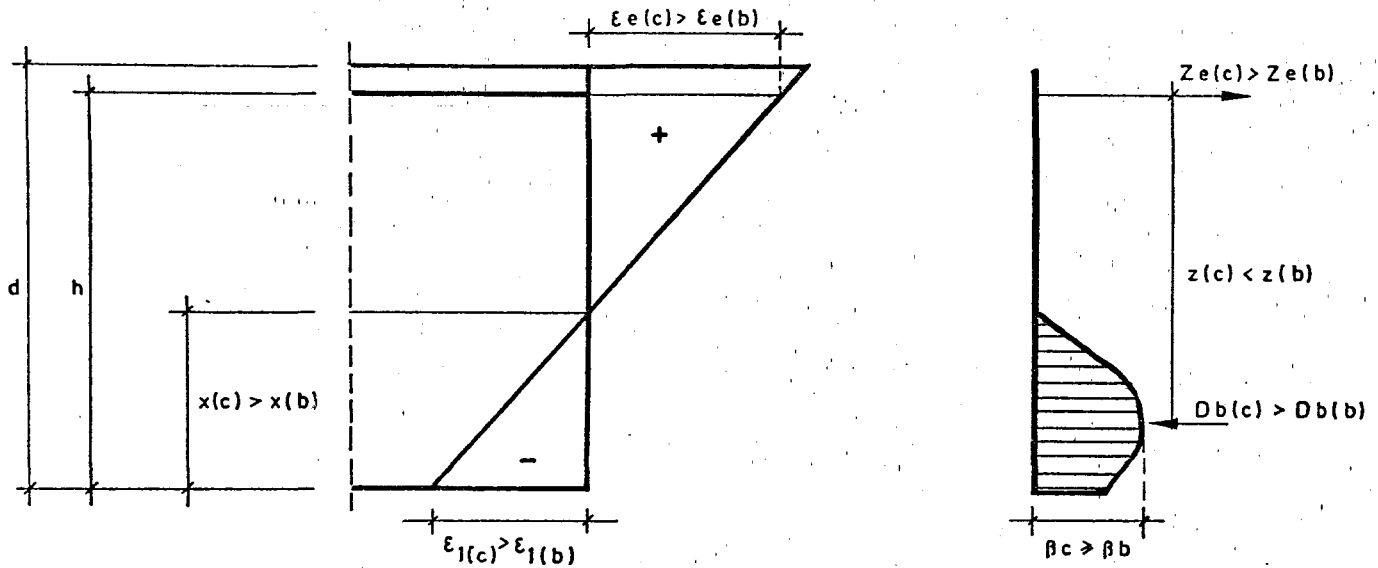


Bild 16

d) Spannungsverteilung im Bruchzustand

Die Spannungen infolge äußerer Last werden besonders im Bereich der Biegedruckzone überlagert durch innere Zwängungsspannungen infolge der nicht-linearen Temperaturverteilung über den Querschnitt. Durch die behinderte Dehnung infolge der starken Erwärmung in den Eckbereichen treten besonders in den ersten 30 Minuten Druckspannungsspitzen auf, die teilweise zu Eckabplatzungen führen können. Durch die schnelle Abnahme des E-Moduls vom

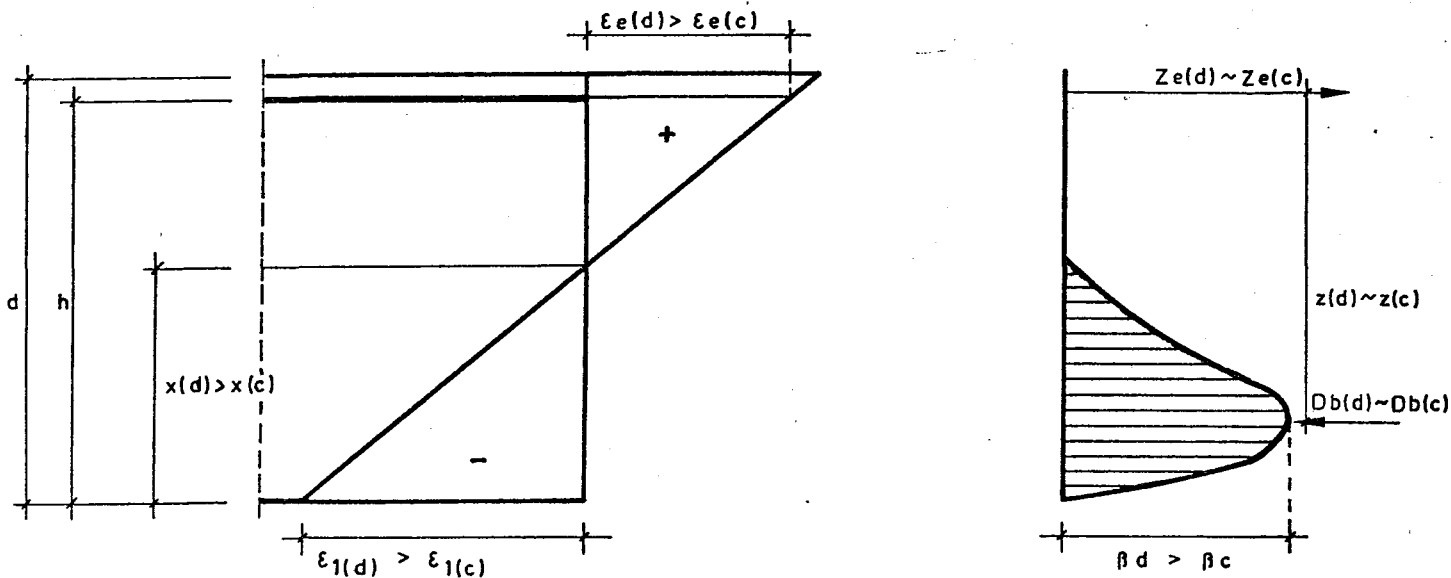


Bild 17

Beton mit fortschreitender Branddauer werden die Druckspannungsspitzen in den Eckbereichen jedoch abgebaut. Bei der Auswertung wird der Einfluß dieser Zwängungsspannungen nicht berücksichtigt.

Die Form der Biegedruckzone wird näherungsweise in vereinfachter Form als Ponton angenommen.

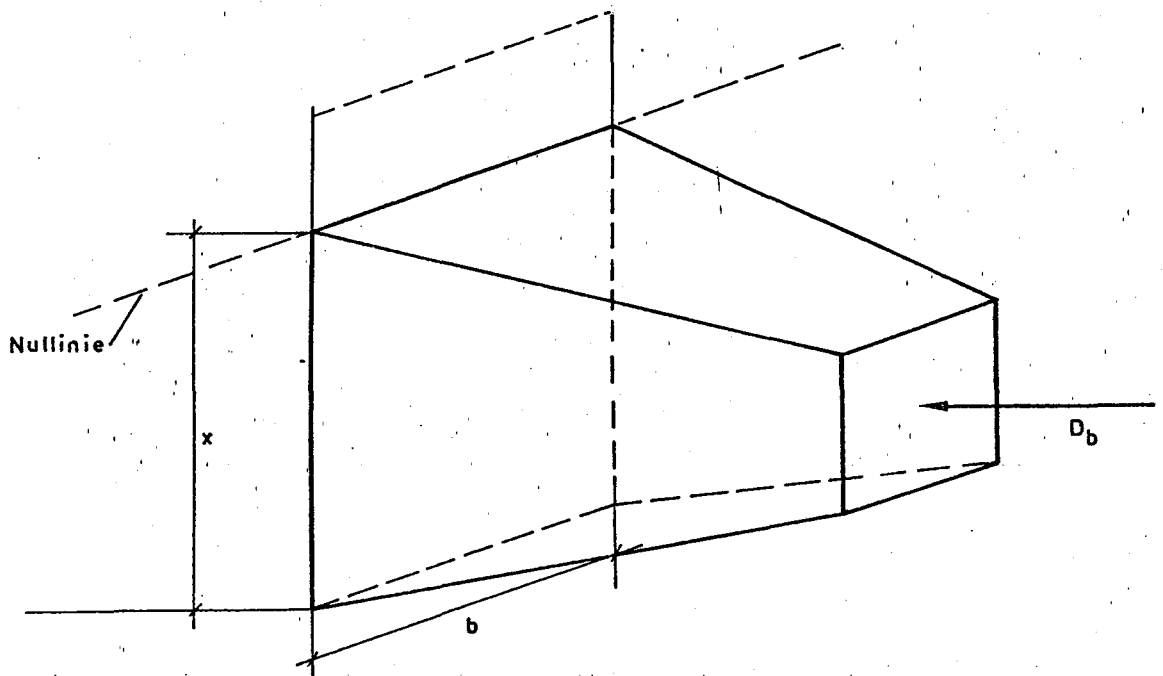


Bild 18: Vereinfachte räumliche Darstellung der Biegedruckzone

Im Bereich maximaler Spannungen (Endfläche des Pontons) wird der Betonquerschnitt auf $\leq 400\text{ }^{\circ}\text{C}$ erwärmt. Dieser Grenzwert wurde gewählt, da die nach [1] an aufgeheizten Betonprismen ermittelte Hochtemperaturfestigkeit bei $400\text{ }^{\circ}\text{C}$ noch etwa 90 % der Festigkeit im Kaltzustand beträgt und von dieser Temperatur an fast linear auf 20 % bei ca. $700\text{ }^{\circ}\text{C}$ abfällt. In stark vereinfachter Form ist so auch ein linearer Spannungsabfall, s. Bild 18, zum Querschnittsrand hin gerechtfertigt.

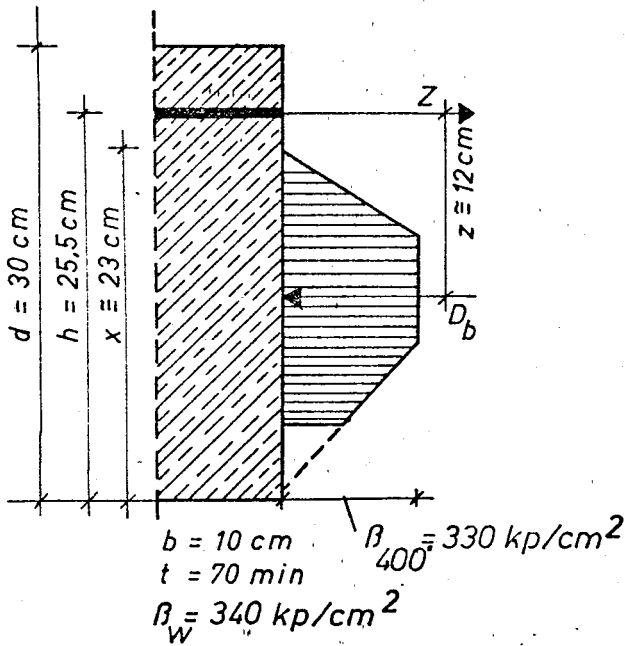
Quantitative Angaben über die Größe der Biegedruckzone (k_x -Wert) und die maximale Betondruckspannung (σ_b) können iterativ aus äußerer Belastung, gemessener Stahldehnung, Bewehrungsgehalt und dem Kräftegleichgewicht $D_b = Z_e$ bzw. $M = D_b \cdot z$ ermittelt werden. Beides sind direkt voneinander abhängige Näherungswerte, die eindeutiger nur unter Berücksichtigung der Dehnungsverträglichkeit bestimmt werden könnten. Im Rahmen dieser Arbeit wird wegen des hohen Rechenaufwandes darauf verzichtet.

In Tafel 8 sind die eingetragenen Momente und die daraus abgeleiteten Stahlspannungen und inneren Kräfte bei bekanntem Bewehrungsgehalt kurz vor dem Bruchzustand zusammengestellt.

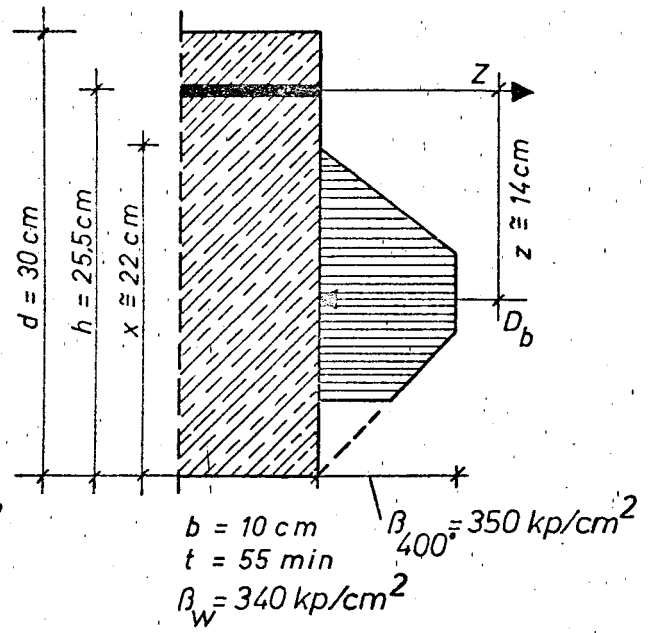
Die in den Bildern 19 - 21 in den unteren Bereichen gestrichelt aufgezeichneten, dem Spannungs-Ponton (Bild 18) entsprechenden Druckspannungsverteilungen weisen dem Beton auch in den stark aufgeheizten Randbereichen eine Resttragfähigkeit in Abhängigkeit von der Temperatur zu (bei ca. 700 °C etwa 20 % der Betondruckfestigkeit im Kaltzustand nach [1]). In Brandversuchen wurde aber festgestellt, daß Beton in der äußeren Schicht infolge der Dehydratation des Calciumhydroxids und der Umwandlung von α -Quarz zu β -Quarz zermürbt wird und keine Druckkräfte mehr übertragen kann.

Aus diesem Grunde wird dem Bereich, der über 600 °C erwärmt wird, keine Tragfähigkeit zugewiesen, und es stellt sich eine Druckspannungsverteilung ein, die im Randbereich dem durchgezogen dargestellten Verlauf in den Bildern 19 - 21 entspricht.

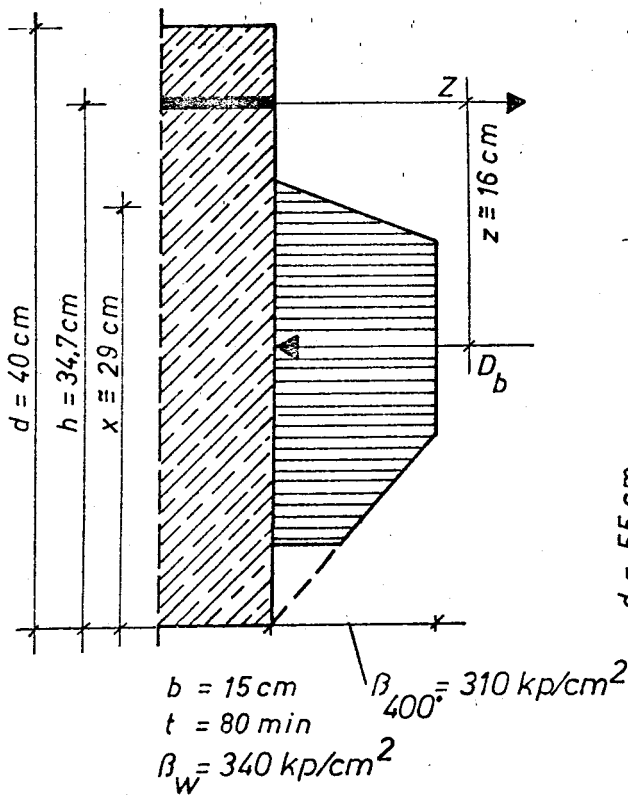
Balken 1



Balken 2



Balken 3+4



Balken 5+6

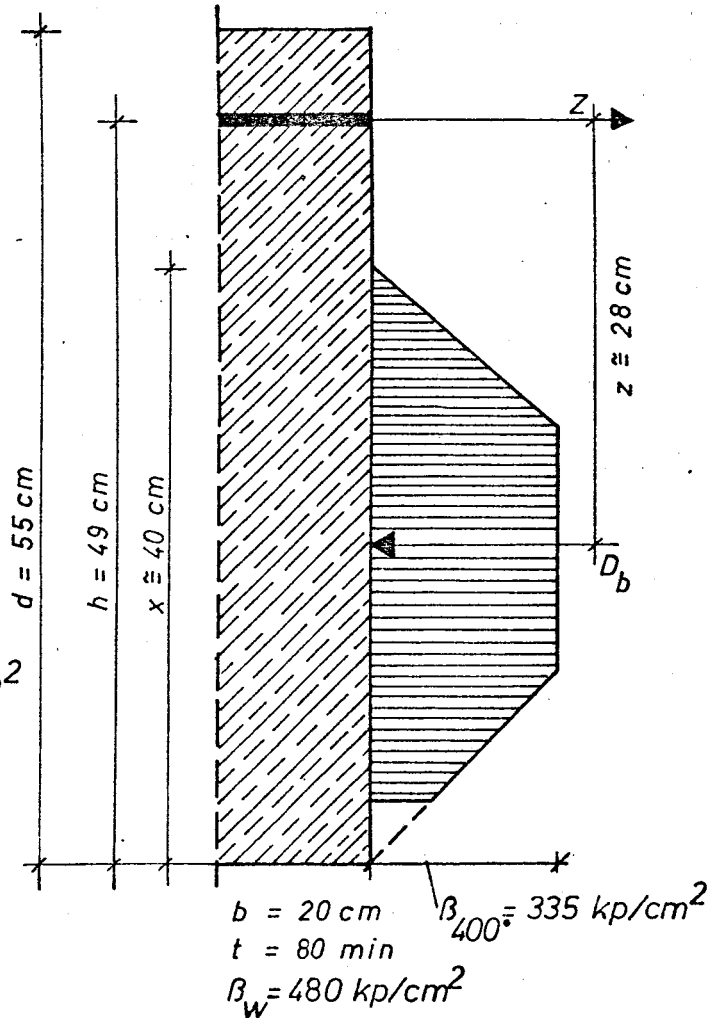
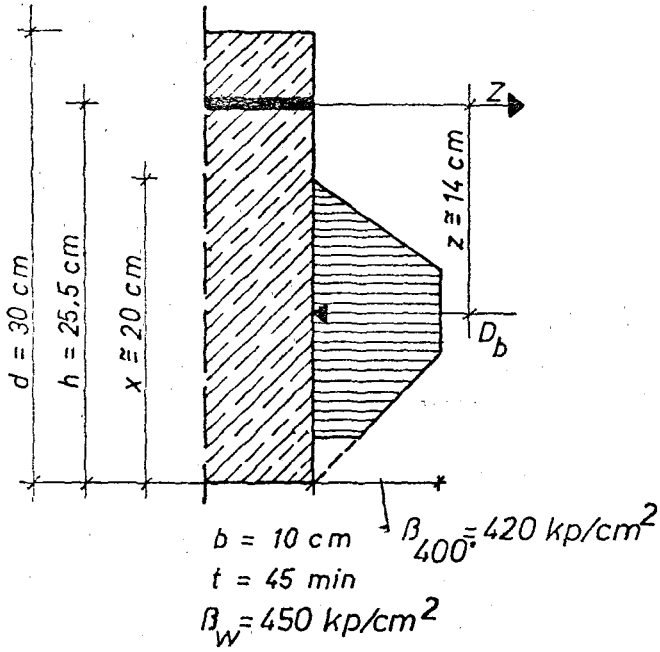
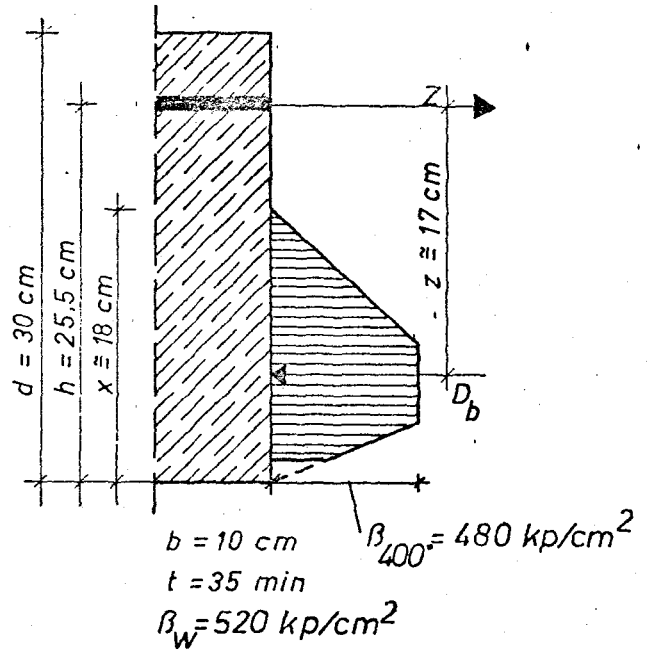


Bild 19: Form der Biegedruckzone der Balken 1 - 6 zum angegebenen Zeitpunkt t (kurz vor dem Bruch) in Balkenachse

Balken 7



Balken 8



Balken 9

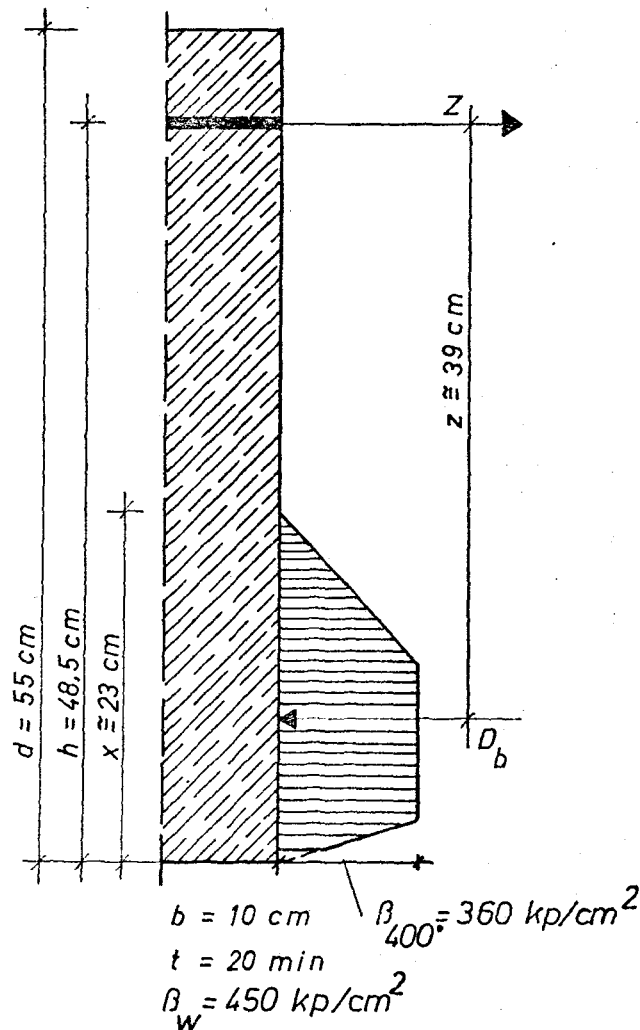
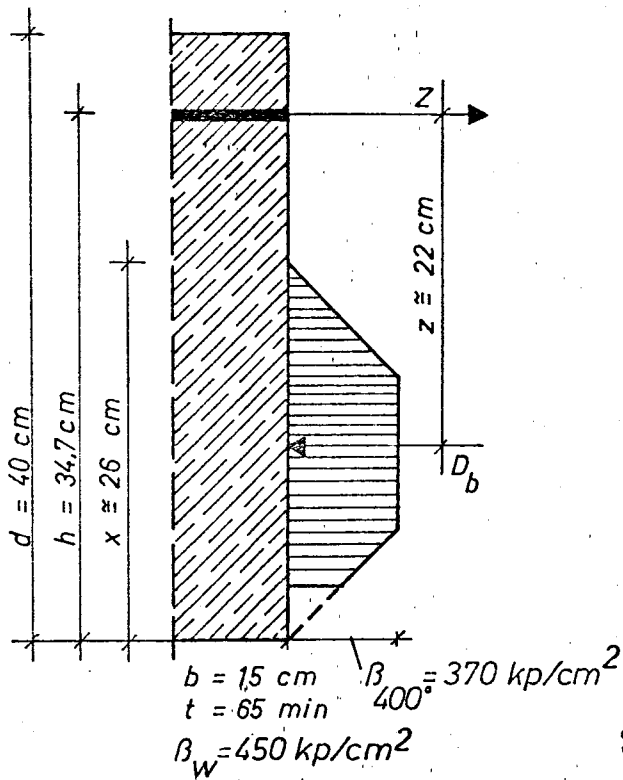
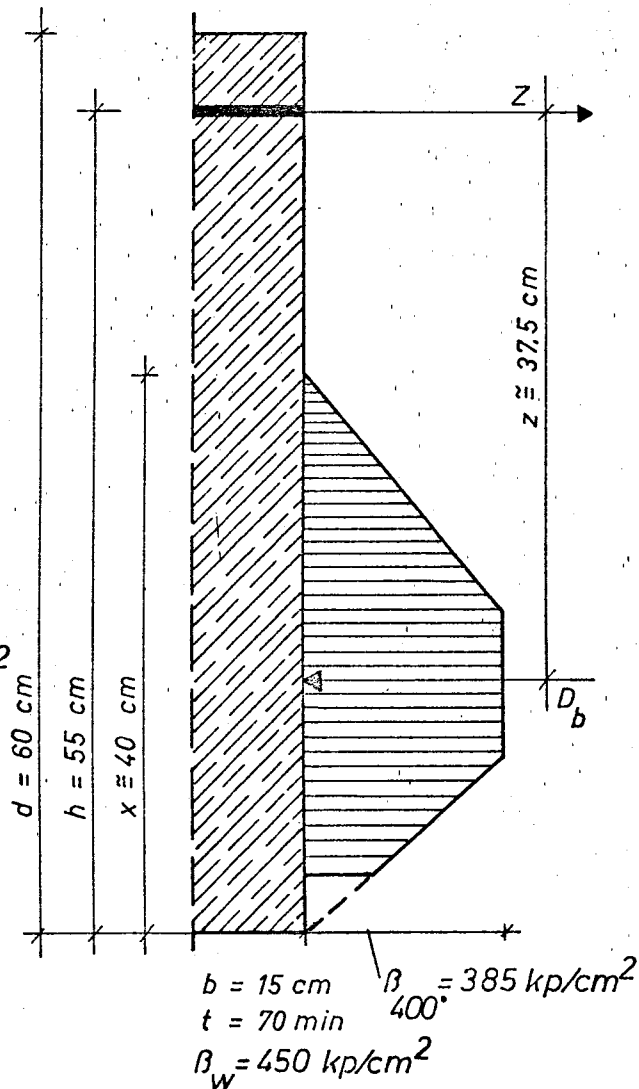


Bild 20: Form der Biegedruckzone der Balken 7 - 9 zum angegebenen Zeitpunkt t

Balken 10



Balken 11



Balken 12

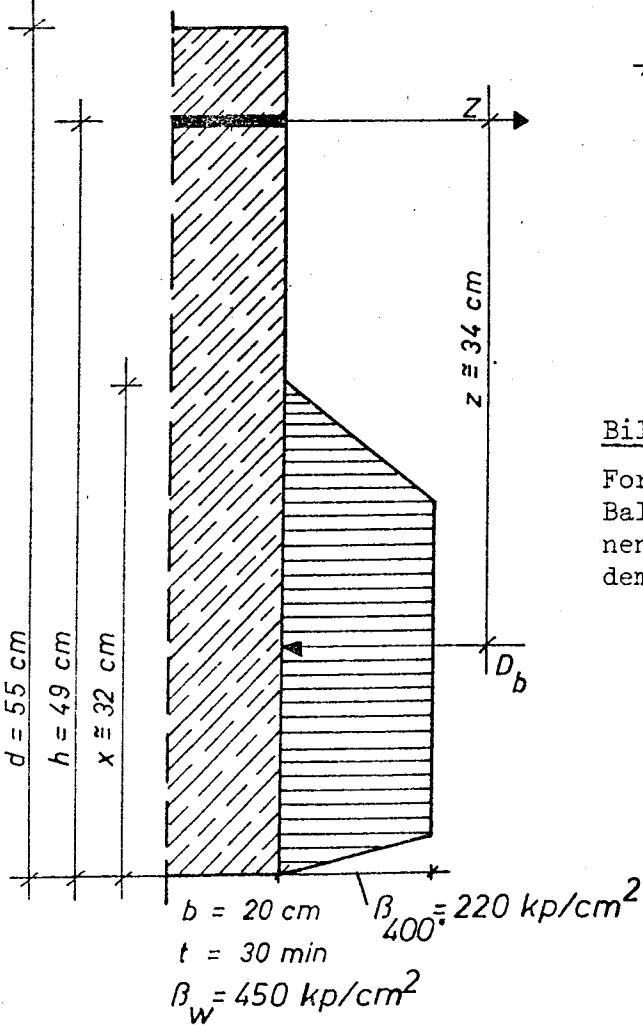


Bild 21:

Form der Biegedruckzone der Balken 10 - 12 zum angegebenen Zeitpunkt t (kurz vor dem Bruch) in Balkenachse

Tafel 8: Spannungsverteilung vor dem Versagen der Querschnitte

Prüfkörper	Breite b [cm]	M _e [Mpm]	Meß- zeitpunkt [min]	σ_e [Mp/cm ²]	F _e [cm ²]	Z _e = D _b [Mp]	h [cm]	k _x	x [cm]	k _z	z [cm]	Bruch Zeit [min]
1	10	3,30	70.	4,45	6,16	27,4	25,5	0,9	~ 23	0,47	12	74.
2	10	3,85	55.	4,65	6,16	28,7	25,5	0,9	~ 22	0,55	14	63.
3	15	10,0	60.	4,89	12,56	61	34,7	0,8	~ 29	0,475	16,5	60.
4	15	10,0	80.	4,99	12,56	62,5	34,7	0,8	~ 29	0,46	16	90.
5	20	27,5	80.	4,64	21,2	98	49	0,8	~ 40	0,57	28	108.
6	20	27,5	80.	4,52	21,6	97	49	0,8	~ 40	0,58	28,5	111.
7	10	4,02	45.	6,35	4,52	28,7	25,5	0,8	~ 20	0,55	14	65.
8	10	5,85	35.	4,63	7,1	32,8	25,5	0,72	~ 18	0,68	~ 17	38.
9	10	15,1	20.	4,19	9,24	38,7	48,5	0,48	23	0,8	39	24.
10	15	11,6	65.	5,20	10,16	53,0	34,7	0,76	26	0,63	22	85.
11	15	27,7	70.	4,82	15,2	73,5	55	0,74	40	0,68	37	72.
12	20	31,5	30.	4,70	19,8	93,5	49	0,66	32	0,70	34	32.

In der folgenden Tafel 9 werden die anhand der vereinfachten Form der Biegedruckzone (Bild 18) und den Werten nach Tafel 8 ermittelten maximalen Betondruckspannungen zum Bruchzeitpunkt wiedergegeben. In Spalte 6 wird die Druckfestigkeit des auf 400 °C aufgeheizten Betonquerschnittes (Spalte 5, obere Fläche des Pontons) zu der Würfelfestigkeit R_{200} zum Zeitpunkt des Brandversuches ins Verhältnis gesetzt.

Tafel 9: Betondruckspannungen

1	2	3	4	5	6	7
Prüf- körper	Betondruck- festigk. zum Versuchs- zeitpunkt (R_{200})	Balken- breite	Versagens- Zeitpunkt	max. Betondruck- spannung zum Versagenszeit- punkt (R_{4000})	$R_{4000}/$ R_{200}	Bemerkungen
	[kp/cm ²]	[cm]	[min]	[kp/cm ²]	[1]	
1	340	10	74	330	0,97	Auflagerver- sagen
2	340	10	63	350	1,03	
3	340	15	(60)	(310)	-	
4	340	15	90	310	0,91	
5	480	20	108	335	0,7	
6	480	20	111	335	0,7	
7	450	10	65	420	0,94	vorgetrocknet Abplatzungen
8	520	10	38	480	0,92	
9	450	10	(24)	(360)	-	
10	450	15	85	370	0,82	
11	450	15	72	385	0,86	Schubbruch
12	450	20	(32)	(220)	-	

Die in Tafel 9 ermittelten Werte für die Heißdruckfestigkeit der Biegedruckzone an Bauteilen bestätigen im wesentlichen die an aufgeheizten Betonprismen gefundenen Werte in Temperaturbereichen bis zu ca. 600 °C.

Alle Versuchsergebnisse zeigen in der Tendenz einen Abfall der Heißdruckfestigkeit mit wachsender Betongüte und damit eine Bestätigung der Untersuchung von Malhotra [10].

Eine baupraktische Bedeutung dieser Aussage muß negiert werden, da die Unterschiede zu gering sind.

Die Heißdruckfestigkeit vom Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlagstoffen liegt bei Temperaturen von 400 °C (siehe Bild 22) zwischen 70 % und 90 % der Festigkeit im kalten Zustand. Das entspricht auch etwa den Werten der Bauteiluntersuchungen (s. Tafel 9).

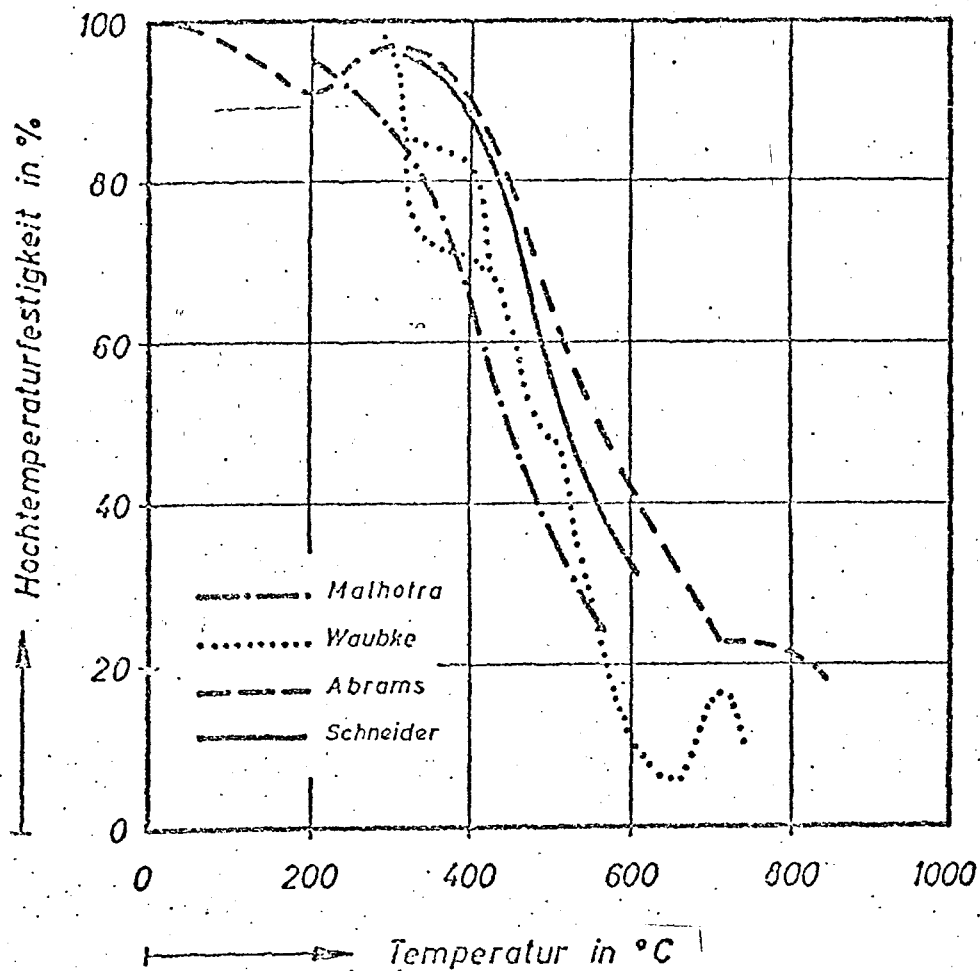


Bild 22: Hochtemperaturfestigkeit von Normalbeton mit quarzhaltigen Zuschlagstoffen [1]

Es fällt allerdings bei der Auswertung auf, daß die über die Näherungsrechnung ermittelte Heißdruckfestigkeit mit wachsender Balkenbreite geringer wird.

Diese Unterschiede sind vermutlich auf die nicht berücksichtigten Zwängungsspannungen infolge des nichtlinearen Temperaturverlaufes über dem Querschnitt zurückzuführen. Untersucht man die Temperaturfelder der 10 cm breiten Balken zum Zeitpunkt des Bruches (siehe Anlage 6.3 und 6.4), so ist ein annähernd linearer mittlerer Temperaturverlauf über die Höhe festzustellen, wenn die Bereiche über 600 °C nicht berücksichtigt werden. Die Zwängungsspannungen im Bereich der Biegedruckzone infolge behinderter Dehnung bleiben gering. Bei den breiteren Balken sind infolge eines sehr stark nichtlinearen Temperaturverlaufes wesentlich größere Zwängungsspannungen zu erwarten (s. Anlagen 6.10, 6.11 und 6.13), so daß die allein über die äußere Last ermittelte Hochtemperaturfestigkeit geringer sein muß als die tatsächliche aus Last und Temperaturzwängungen ermittelte Hochtemperaturfestigkeit.

4.4 Rechnerische Ermittlung der Spannungsverteilung unter Berücksichtigung einer mittleren Temperaturkurve (vereinfachte Kontrollberechnung)

Für eine rechnerische Näherungslösung werden einige Eingabewerte vereinfacht:

- a) Die Hochtemperaturfestigkeit vom Normalbeton wird als bilineare Abhängigkeit von der Temperatur angesetzt.

$$T \leq 400 \text{ °C} \quad \beta_T = 0,9 \quad \beta_{20^\circ}$$

$$T \geq 400 \text{ °C} \quad \beta_T = 1,93 \left(1 - \frac{1}{750} \cdot T \right) \beta_{20^\circ}$$

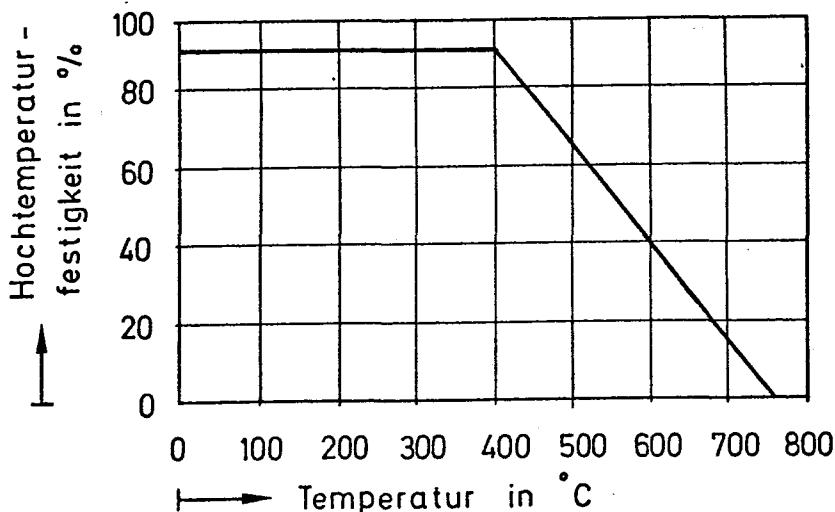


Bild 24: Vereinfachte Darstellung der Hochtemperaturfestigkeit vom Normalbeton

- b) Als maßgebende Temperatur ist in den Anlagen 6.1 bis 6.13 der senkrechte Verlauf der über die Balkenbreite gemittelten Temperaturgradienten aufgezeichnet. Diese Vereinfachung ist zulässig, da das Festigkeitsfeld des über 400°C erwärmten Betonquerschnittes dem Temperaturfeld linear proportional ist.
- c) Die Dehnungsverträglichkeit bleibt unberücksichtigt.

Aus Tafel 8 sind das aufgebrachte Moment (M_e), die Stahlzugkraft (Z_e) und die Lage der Druckresultierenden (z = Hebelarm der inneren Kräfte) zu entnehmen. Über die Höhe der Druckzone (x) und die temperaturabhängige Betondruckfestigkeit läßt sich somit auch die Form der Biegedruckzone näherungsweise festlegen.

Als Beispiel wird im folgenden Balken 4 ($b/d = 15/40$ cm) kurz vor dem Bruch untersucht. Es ist festzustellen, ob die Tragfähigkeit des 15 cm breiten Balkens nach 90 Minuten Brandbeanspruchung rechnerisch noch gewährleistet werden kann.

Im untersuchten Querschnitt wird über die Balkenhöhe die zur jeweiligen mittleren Temperatur gehörige Betondruckfestigkeit aufgetragen (s. Bild 25). Der schraffierte Bereich ergibt dann die maximal mögliche Druckspannungsverteilung. Die Auswertung zeigt, daß die Druckspannungen zum untersuchten Zeitpunkt gerade noch aufgenommen werden können, daß für 15 cm breite Balken eine Feuerwiderstandsdauer von 90 Minuten zu erwarten ist.

Die gleiche Untersuchung wurde auch an 10 cm und 20 cm breiten Balken durchgeführt. Die Versuchsergebnisse von 60 Minuten und etwa 110 Minuten konnten bestätigt werden.

Diese Berechnung stellt eine grobe Vereinfachung dar, da Dehnungsverträglichkeit und innere Zwängungsspannungen nicht berücksichtigt wurden. Die Bestätigung der Versuchsergebnisse zeigt jedoch, daß auf verhältnismäßig einfachem Wege eine rechnerische Kontrolle möglich ist, wenn die Temperaturverteilung über den Querschnitt bekannt ist.

Balken 4

$b/d/h = 15/40/34,7 \text{ cm}$

$B_n 250 \quad B_{200} = 340 \text{ kp/cm}^2$

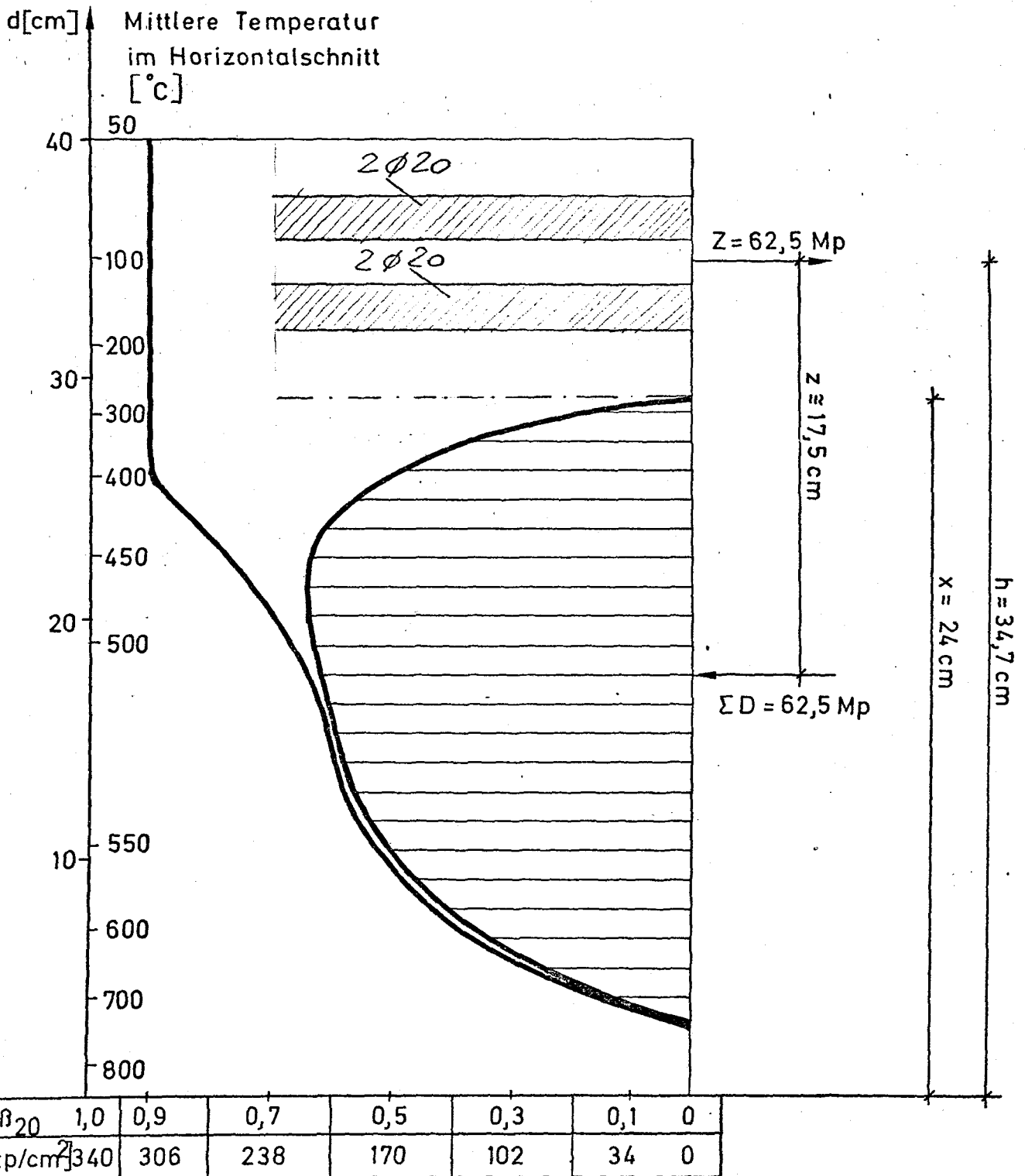


Bild 25: Druckspannungsverteilung im Balken 4 nach 90 Minuten Brandbeanspruchung

4.5. Betonabplatzungen

Bei allen Versuchskörpern mit einem Seitenverhältnis (voll beheizte Flächen) von $b/d_F = 1 : 2$ traten keine explosionsartigen Abplatzungen auf, obwohl teilweise nur 10 cm breite Balken unter hohen Druckspannungen geprüft wurden. Das bestätigt im wesentlichen die Ergebnisse aus den Versuchen an Stahlbetondurchlaufträgern [7] und führt zu der Folgerung, daß 10 cm breite Balken, auch wenn sie hohen Druckspannungen ausgesetzt sind und einen Feuchtigkeitsgehalt von ca. 3 Gew.-% aufweisen; bei einem Seitenverhältnis von $\geq 1 : 2$ nicht "abplatzgefährdet" sind, da der Feuchtigkeitstransport zur nicht beheizten Oberfläche hin erfolgen kann.

Bei sehr schlanken, 10 cm breiten Balken ($b/d_F \leq 1 : 4$) traten explosionsartige Abplatzungen auf (s. Tafel 7, Balken 9) und führten zum Versagen der Konstruktion. Für diese Balken und für zweiseitig beheizte Stege von I-Querschnitten sind die Mindestabmessungen nach [11] einzuhalten.

4.6. Vorschlag von Mindestabmessungen der Biegedruckzone für die Einstufung in bestimmte Feuerwiderstandsklassen nach DIN 4102

Wird die Druckzone von Stahlbeton- bzw. Spannbetonbalken im Brandfall einer dreiseitigen Beflammung ausgesetzt, so sind zur Erlangung einer geforderten Feuerwiderstandsdauer in Abhängigkeit vom Ausnutzungsgrad der Druckzone und vom statischen System des Bauteiles bestimmte Bedingungen hinsichtlich der Abmessungen des Betonquerschnittes zu erfüllen.

Im vorliegenden Entwurf wird unterschieden zwischen

- a) statisch unbestimmt gelagerten Balken, die im Gebrauchszustand ohne Druckbewehrung so bemessen werden, daß der Dehnungszustand $\epsilon_e = 3,0 \text{ ‰} / \epsilon_1 = - 3,5 \text{ ‰}$ (zugehöriger Richtwert k_h^{**}) nicht überschritten wird. Mit dem in Abschnitt 2 beschriebenen Spannungsnachweis nach [12] ergibt sich bei Spannungsverteilung in der Druckzone eine Randspannung von $\sigma_{bRand} \leq 0,60 \beta_{w28}$. Werden diese statisch unbestimmt gelagerten Balken einer Brandbeanspruchung ausgesetzt, so ruft die Behinderung der freien Durchbiegung oder der freien Rotation Zwangsmomente hervor, die die Gebrauchsmomente überlagern. In Abhängigkeit von den Spannungsreserven bis zur Fließgrenze der Biegezugbewehrung im betrachteten Querschnitt kann das Gesamtmoment bei einem Sicherheitsfaktor von $\nu = 1,75$ mindestens auf das 1,75-fache des Gebrauchsmomentes anwachsen, wenn die Biegedruckzone ebenfalls in der Lage ist, diesen Spannungszuwachs aufzunehmen.
- b) Statisch unbestimmt gelagerten Balken, die im Gebrauchszustand so bemessen wurden, daß die rechnerische Betonrandspannung $\sigma_{bRand} \leq 0,3 \beta_{w28}$ bleibt (zugehöriger k_h -Wert $\sim 2 k_h^{**}$) bzw. statisch bestimmt gelagerte Balken mit einer maximalen Betonrandspannung von $\sigma_{bRand} \leq 0,6 \beta_{w28}$ (zugehöriger Richtwert k_h^{**}) und
- c) statisch bestimmt gelagerte Balken mit einer rechnerischen Betonrandspannung von $\sigma_{bRand} \leq 0,3 \beta_{w28}$ (zugehöriger k_h -Wert $\sim 2 k_h^{**}$).

Da für die Bestimmung der Feuerwiderstandsdauer von 180 Minuten keine Versuche durchgeführt wurden, mußten die zugehörigen Werte über eine Vergleichsberechnung entsprechend Abschnitt 4.4 ermittelt werden. Die Temperaturfelder wurden für eine Beanspruchungsdauer von 180 Minuten mit vorhandenen Rechenprogrammen [13] ermittelt und mit Erwärmungsversuchen [14] verglichen.

Im folgenden Bild 26 wird die Feuerwiderstandsdauer der Biegedruckzone in Abhängigkeit von der Balkenbreite bei einer unterschiedlichen Spannungsausnutzung und verschiedenen statischen Systemen graphisch dargestellt.

Aus den Werten nach Bild 26 wurde die folgende Tafel 10 mit den Mindestabmessungen für die Biegedruckzone von dreiseitig beflamten Balken entwickelt.

T a f e l 10: Mindestabmessung b_{\min} [cm] - Biegedruckzone von dreiseitig beflamten Stahlbetonbalken bei einem Seitenverhältnis von $b/d_F \geq 1 : 2$

Zeile	Bauteil	Feuerwiderstandsklasse				
		F 30	F 60	F 90	F 120	F 180
a	Statisch unbestimmt gelagerte Balken bei maximaler Druckspannungsausnutzung gemäß DIN 1045 ($k_h \cong k_h^*$)	10	10	15	22	28
b	Statisch bestimmt gelagerte Balken bei maximaler Druckspannungsausnutzung gemäß DIN 1045 ($k_h \cong k_h^*$) und statisch unbestimmt gelagerten Balken bei einer Spannungsausnutzung σ_{bRand}/β_w von $\leq 0,3$ ($k_h \cong 2 k_h^*$)	10	10	13	18	24
c	Statisch bestimmt gelagerte Balken bei einer Spannungsausnutzung σ_{bRand}/β_w von $\leq 0,3$ ($k_h \cong 2 k_h^*$)	10	10	10	15	20

Anmerkungen:

1. Für die Betonrandspannungen im Gebrauchszustand wird ein dreiecksförmiger Spannungsverlauf nach [12] zugrunde gelegt.
2. Die Mindestbreite von 10 cm wurde gewählt, um zerstörende Abplatzungen zu vermeiden.

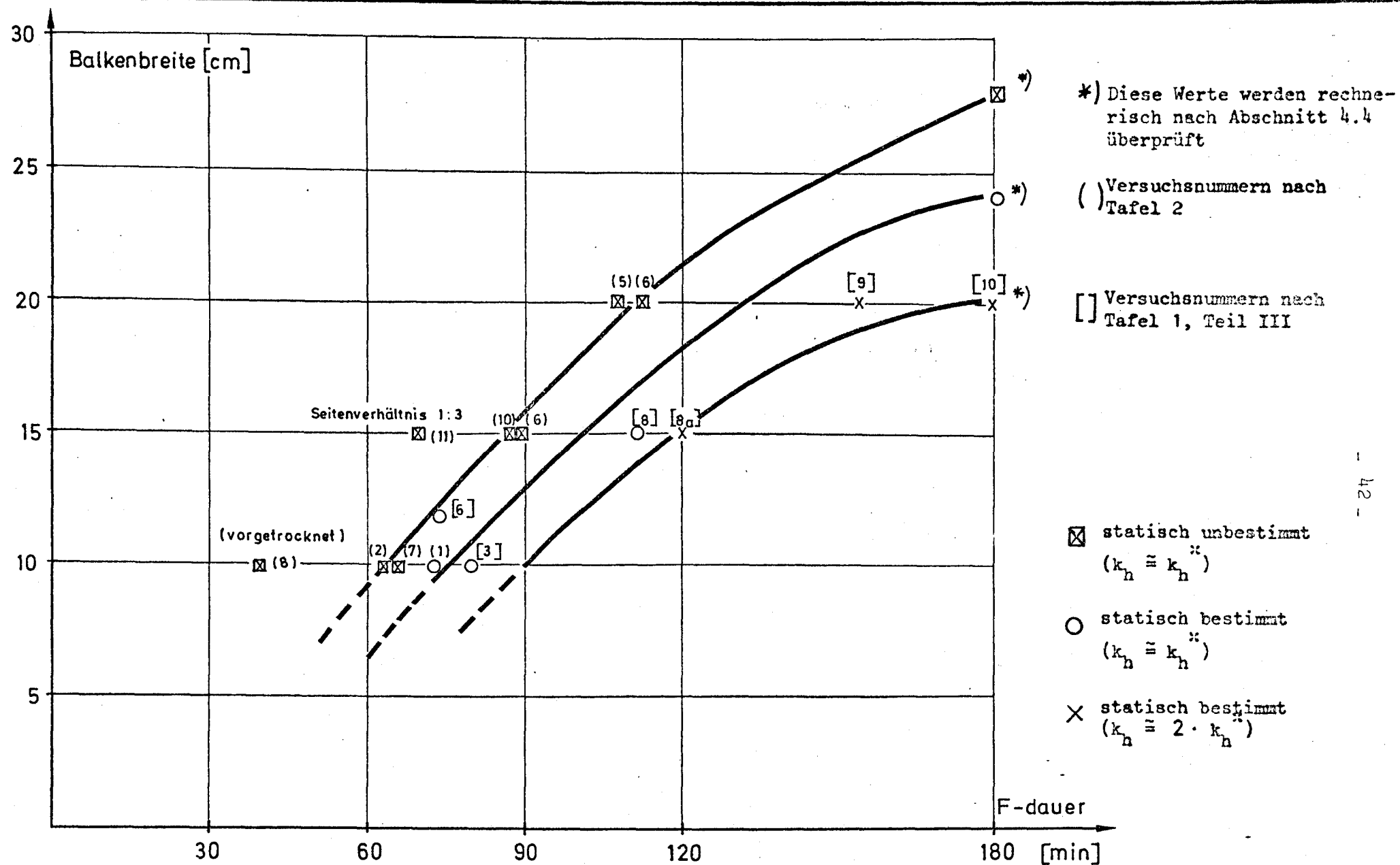


Bild 26: Feuerwiderstandsdauer der Biegedruckzone von statisch bestimmt und statisch unbestimmt gelagerten Balken

Fast alle Versuche wurden an Balken mit einem Seitenverhältnis $b/d = 1 : 2$ durchgeführt, lediglich ein Balken (Versuch 11, Tafel 2) hatte ein Seitenverhältnis von $1 : 3$. Da die Feuerwiderstandsdauer dieses Balkens deutlich kleiner war als bei einem entsprechenden Balken mit einem Seitenverhältnis von $b/d = 1 : 2$ (Versuch 10, Tafel 2 + 8), wird vorgeschlagen, für Balken mit einem Seitenverhältnis $b/d \leq 1 : 3$ die Mindestbreiten um 2,0 cm zu vergrößern.

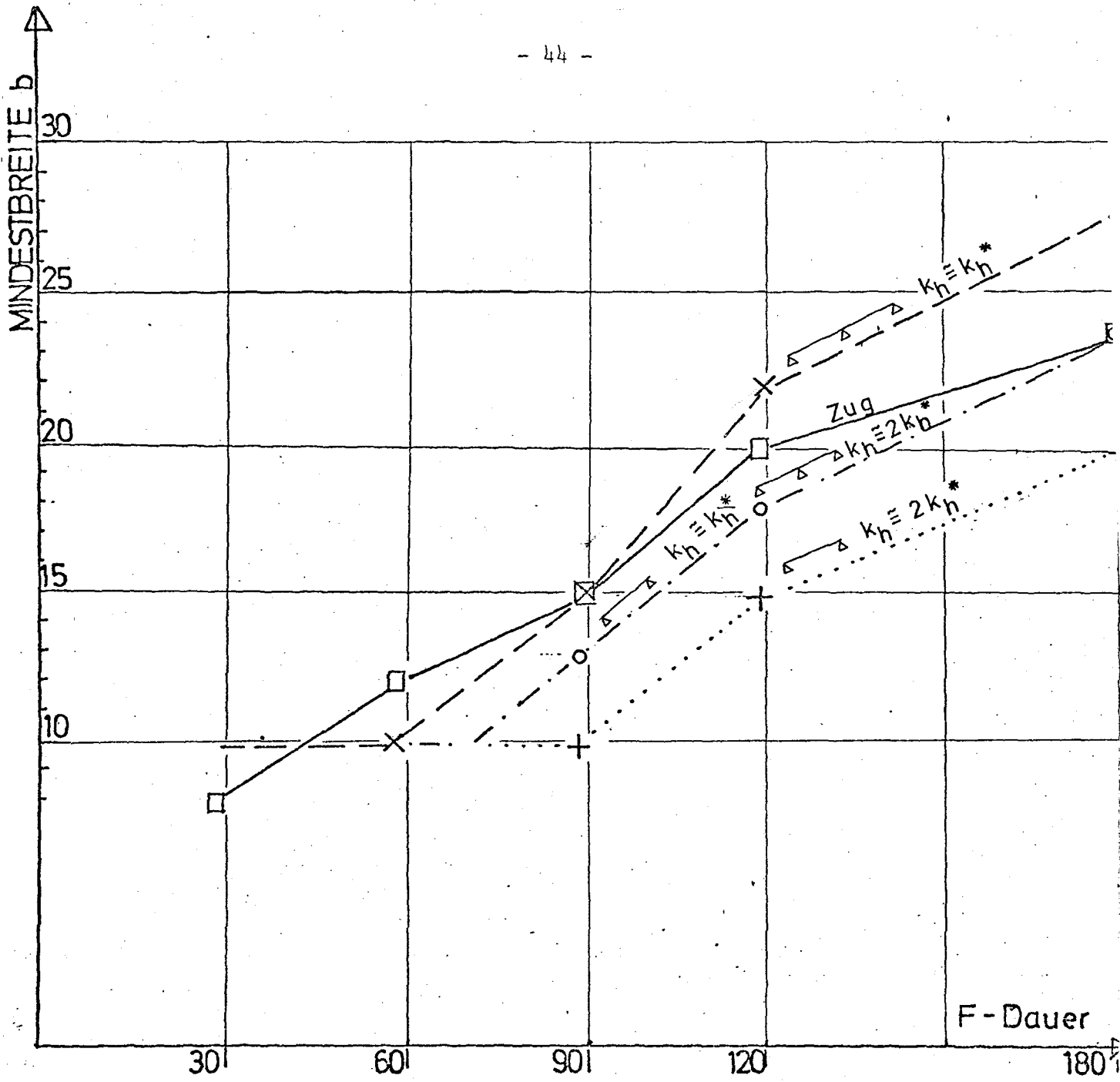
5. Zusammenfassung und Wertung der Versuchsergebnisse

Wird im Brandfall die Druckzone von Stahlbetonbalken bzw. -rippendecken oder von Rahmenkonstruktionen der direkten Beflammung ausgesetzt, so sind in Abhängigkeit vom statischen System und der vorhandenen Betondruckspannung zur Einstufung in bestimmte Feuerwiderstandsklassen die Mindestabmessungen nach Tafel 10 einzuhalten.

Wichtigster Anwendungsbereich für die Praxis wird die Einstufung von statisch unbestimmt gelagerten Stahlbetonkonstruktionen (Durchlaufträger, Rahmenkonstruktionen o. ä.) sein, bei denen im Bereich negativer Momente die Biegedruckzone dreiseitig beflammt wird. Bei statisch bestimmt gelagerten Balken wird dagegen die Druckzone in den wenigsten Fällen dreiseitig beheizt.

Im folgenden Bild 27 werden die entsprechenden Mindestabmessungen aufgetragen und den Mindestabmessungen für die Biegezugzone gegenübergestellt. Als Kriterien für den Ausnutzungsgrad der Biegedruckzone werden allein die k_h -Werte angegeben, um einen möglichst praxisnahen Gebrauch zu gewährleisten.

Auch im Bereich der Eintragung der Vorspannung von Spannbetonbalken sind hohe Druckspannungen bei dreiseitiger Beflammung zu erwarten. Es wird vorgeschlagen, für diese Bauteile zunächst die Mindestabmessungen nach Zeile b von Tafel 10 zu wählen, obwohl über Schwind- und Kriecheinflüsse sowie über das Verbundverhalten bei hohen Temperaturen sehr wenige Versuchsergebnisse vorliegen. Wie groß die Spannkraftverluste und damit auch die Abminderung der Betondruckspannungen im Eintragungsbereich der Vorspannung unter Temperaturbeanspruchung sind, läßt sich anhand der wenigen Versuche nicht abschließend feststellen. Es sind daher weitere Arbeiten auf diesem Gebiete erforderlich.



- Mindestabmessungen Biegezugzone [16]
- - - X - - - " Biegedruckzone (Tafel 14, Zeile a)
- · - · - O - · - · " " (Tafel 14, Zeile b)
- · · · + · · · · " " (Tafel 14, Zeile c)

Bild 27: Mindestabmessungen der Biegedruck- und der Biegezugzone

Literatur

- [1] Schneider, U.: Zur Kinetik festigkeitsmindernder Reaktionen in Normalbetonen bei hohen Temperaturen. Dissertation, TU Braunschweig (1973).
- [2] Abrams, H.S.: Compression strength of concrete at temperatures to 1600 F. ACI. SP 25-2 (1969).
- [3] Cruz, C.R.: Elastic properties of concrete at high temperatures. J. PCA Research and Development Laboratories, Vol. 8, Nr. 1 (1966).
- [4] Bierbauer, N.: Rechnerische Ermittlung der Tragfähigkeit der Biegedruckzone im negativen Momentenbereich durchlaufender Stahlbetonplatten und -balken bei Brandbeanspruchung nach DIN 4102. Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (in Vorbereitung)
- [5] Kordina, K.: Untersuchungen über das Verhalten der Biegedruckzone bei Stahlbetonbauteilen unter besonderer Berücksichtigung der Brandbeanspruchung bei Schutzbauten. Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (1968).
- [6] Wesche, J.: Untersuchungen über das Verhalten der Biegedruckzone bei Stahlbetonbalken und -rippendecken bei dreiseitigem Feuerangriff. Vorläufiger Abschlußbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (1970).
- [7] Wesche, J.: Stahlbetondurchlaufkonstruktionen unter Feuerangriff. Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (1974).
- [8] Ehm, H., Krampf, L., und v. Postel, R.: Durchlaufende Stahlbetonkonstruktionen unter Brandbeanspruchung. Vorläufiger Endbericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (1968, 1970).
- [9] Leonhardt, F.: Anfängliche und nachträgliche Durchbiegung von Stahlbetonbauteilen im Zustand II. Beton und Stahlbeton 1959, S. 240 - 247.
- [10] Malhotra, H.L.: The effect of temperature on the compression strength of concrete. Magazine of Concrete Research 8,23 (1956).

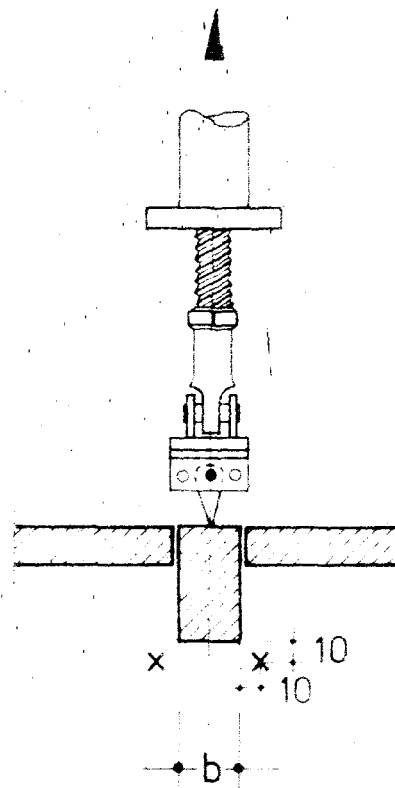
- [11] Meyer-Ottens, C.: Zur Frage der Abplatzungen an Betonbauteilen aus Normalbeton bei Brandbeanspruchung. Dissertation an der TU Braunschweig (1972).
- [12] Luetkens, O.: Bemessung der Stahlbetonbauteile. Betonkalender 1970, Seite 569.
- [13] Ehm, H.: Beitrag zur rechnerischen Bemessung von brandbeanspruchten balkenartigen Stahlbetonbauteilen. Heft 7 des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (1967).
- [14] Schneider, U., Dreyer, R.: Untersuchung über die Feuerwiderstandsdauer von Spannbetonbauteilen mit nachträglichem Verbund bei Brandbeanspruchung. Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (1971).
- [15] Wesche, J.: Untersuchungen über das Verhalten der Biegedruckzone bei Stahlbetonplatten bei einseitigem Feuerangriff. Bericht des Instituts für Baustoffkunde und Stahlbetonbau der TU Braunschweig (1970).
- [16] Kordina, K.: Grundlagen für den Entwurf von Stahlbeton- und Spannbetonbauteilen mit bestimmter Feuerwiderstandsdauer. Beitrag in "Stahlbetonbau" (Festschrift Prof. Rüschi) (1969).

Verzeichnis der Tafeln

	Seite
Tafel 1: Bisher durchgeführte Versuche	3
Tafel 2: Versuchsprogramm	5
Tafel 3: Betonzusammensetzung	6
Tafel 4: Festigkeit der Stahleinlagen	7
Tafel 5: Schnittgrößen und Bemessung	9
Tafel 6: Betonfeuchtigkeitsgehalt	10
Tafel 7: Angaben über Versuchsbeobachtungen	22
Tafel 8: Spannungsverteilung vor dem Versagen der Querschnitte . .	33
Tafel 9: Betondruckspannungen	34
Tafel 10: Mindestabmessungen b_{\min} [cm] der Biegedruckzone von drei- seitig beflamten Stahlbetonbalken bei einem Seitenver- hältnis von $b/d_F = 1 : 2$	41

Verzeichnis der Anlagen

Anlage 1	- Versuchsaufbau
Anlage 2.1 - 2.9	- Bewehrungszeichnungen der Versuchskörper
Anlage 3	- Verankerung der Hülzen
Anlage 4	- Spannungstrajektorien der Balken 11 + 12
Anlage 5.1 - 5.11	- Darstellung der Verläufe von Spannung und Dehnung der Zugbewehrung sowie Momenten- und Zugkraftverlauf
Anlage 6.1 - 6.13	- Temperaturfelder



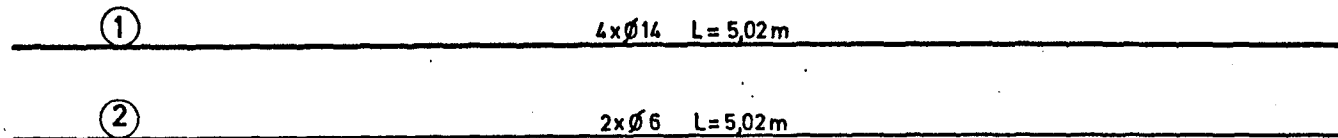
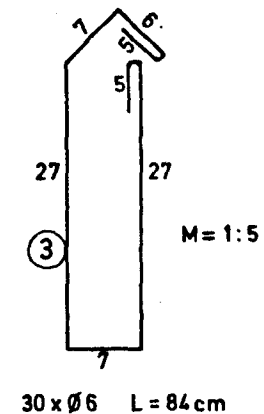
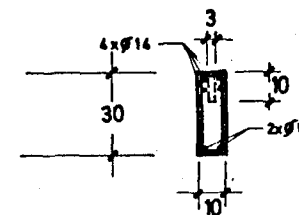
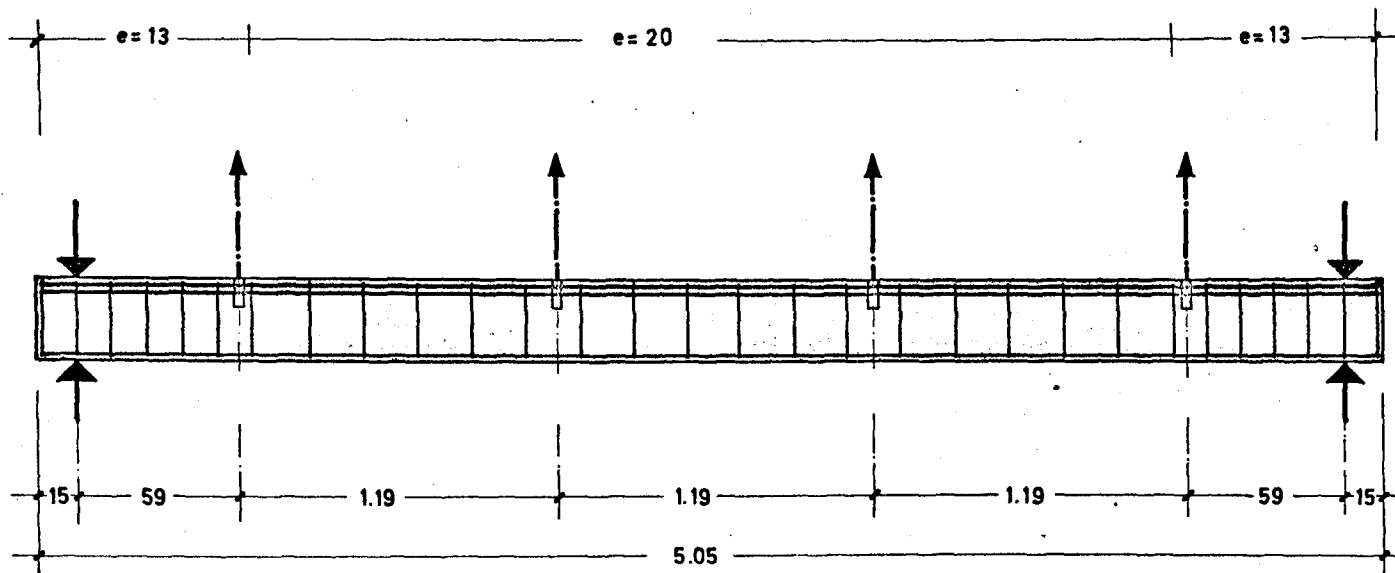
Brandraum

Schnitt A-A

x Brandraum -
temperatur -
messung

B

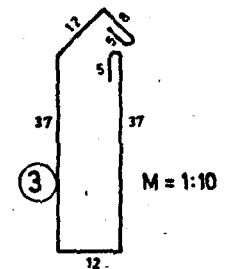
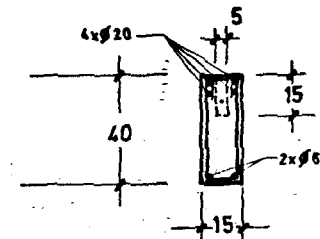
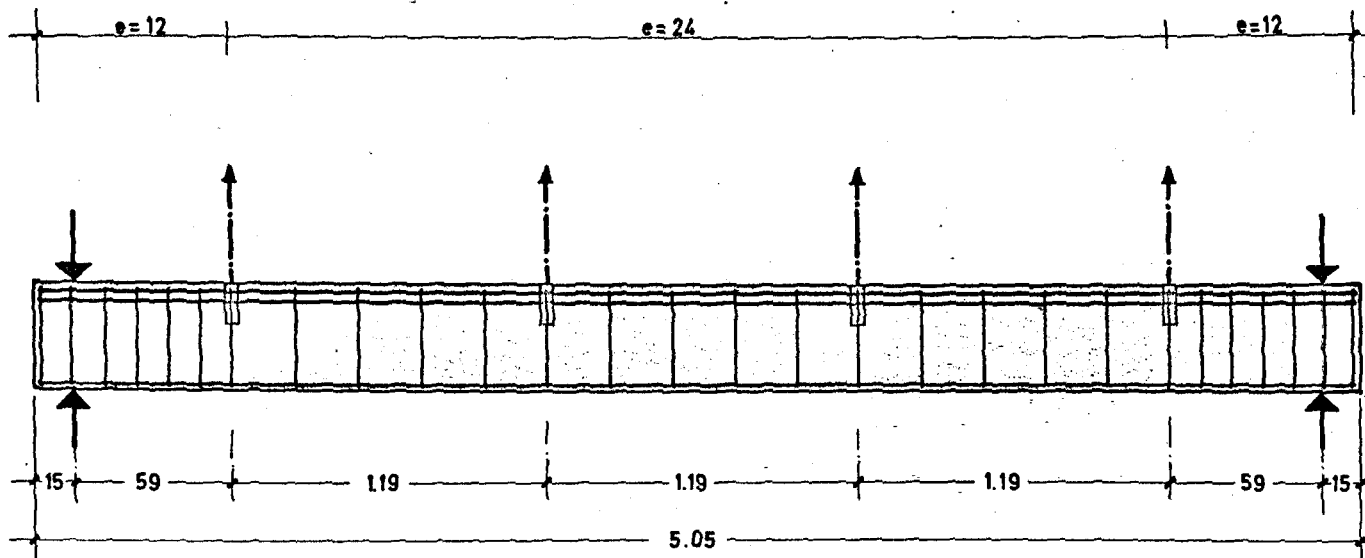
Versuchsaufbau	alle Prüfkörper
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 1
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig	



Maßstab = 1:20

Nr.	Stck.	Ø	L	L _{ges.}	
				Ø6	Ø14
1	4	14	5,02		20,08
2	2	6	5,02	10,04	
3	30	6	0,84	25,20	
L [m]				35,24	20,08
G [kg]				8	25

Schal- und Bewehrungsplan	Balken 1+2
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 2.1
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

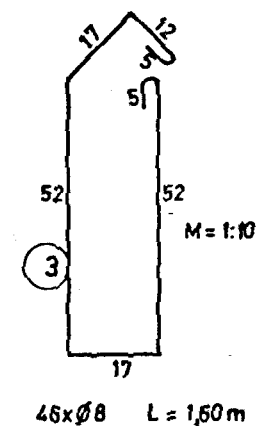
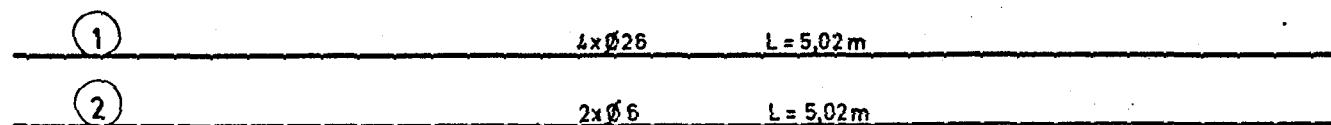
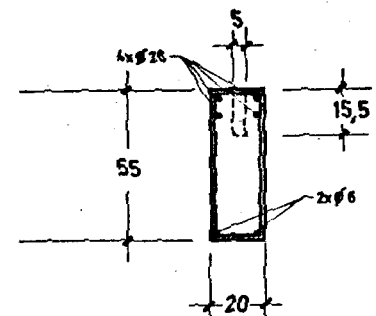
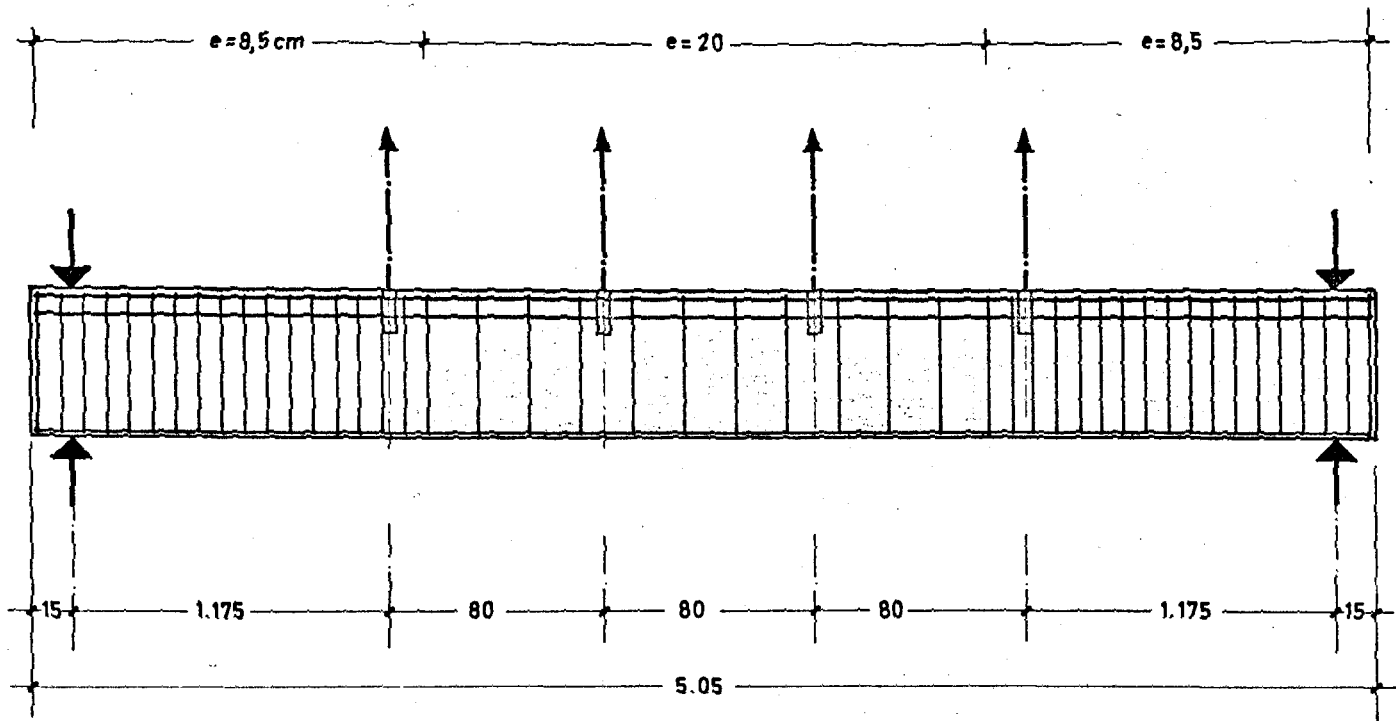


28 x Ø 8 L = 1,16 m

M = 1:20

Nr.	Stck	Ø	L	L ges.		
				Ø 6	Ø 8	Ø 20
1	4	20	5,02			20,08
2	2	6	5,02	10,04		
3	28	8	1,16		32,48	
L [m]				10,04	32,48	20,08
G [kg]				2,5	13	50

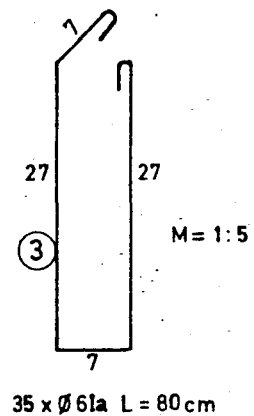
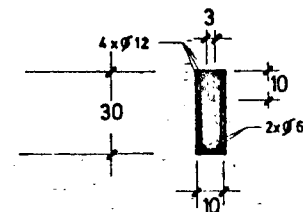
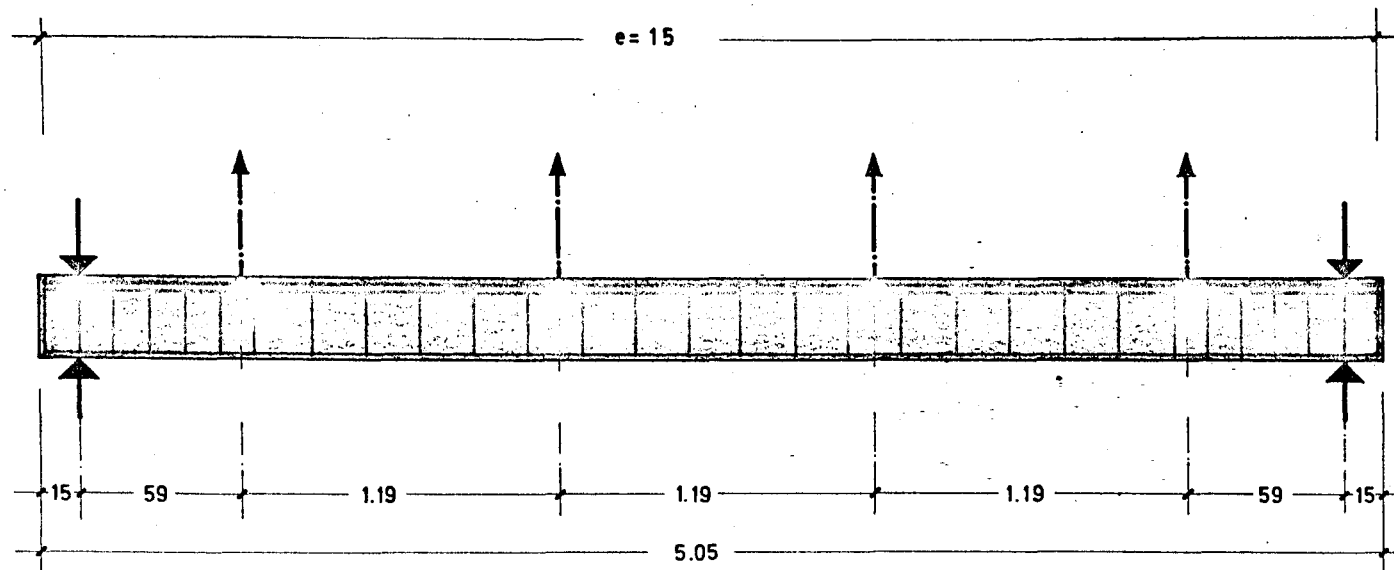
Schal - und Bewehrungsplan	Balken 3+4
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 2.2
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Maßstab = 1:20

Nr.	Stück	Ø	L	L _{ges.}		
				Ø 6	Ø 8	Ø 26
1	4	26	5,02			20,08
2	2	6	5,02	10,04		
3	46	8	1,60		73,60	
L [m]				10,04	73,60	20,08
G [kg]				2,5	29	84

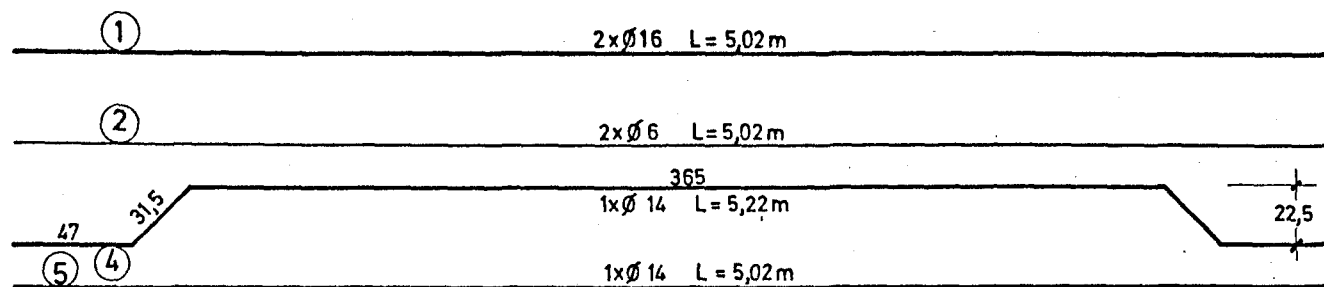
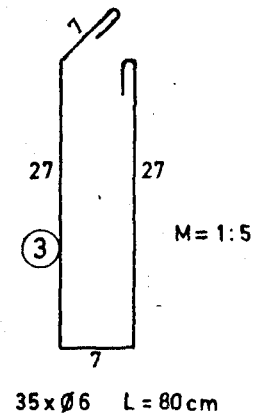
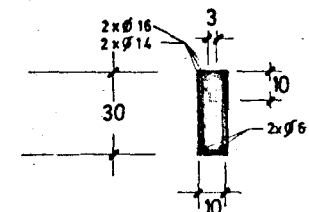
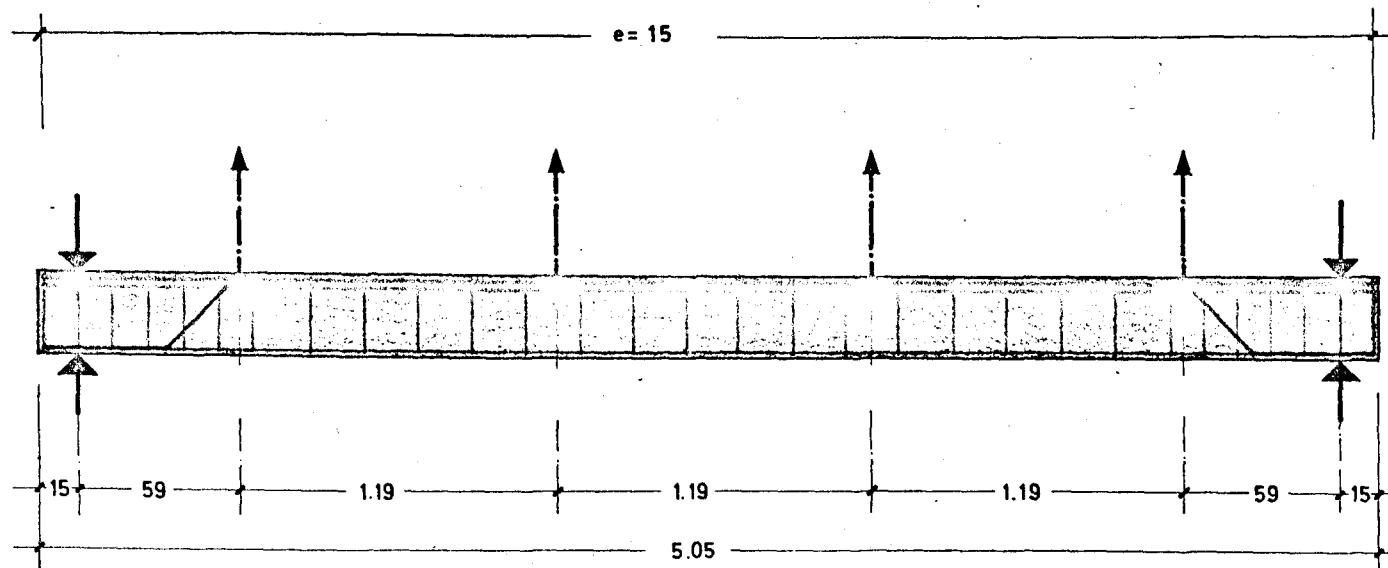
Schal-und Bewehrungsplan	Balken 5+6
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 2.3
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Maßstab = 1:20

Nr.	Stck.	\varnothing	L	L _{ges.}	
				$\varnothing 6$	$\varnothing 2$
1	4	14	5,02		20,08
2	2	6	5,02	10,04	
3	35	6	0,80	28,00	
L [m]				38,04	20,08
G [kg]				8	25

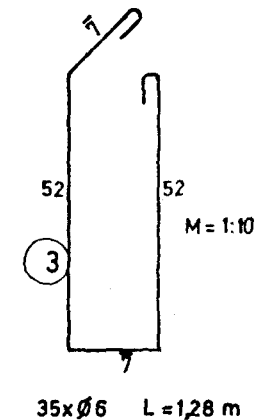
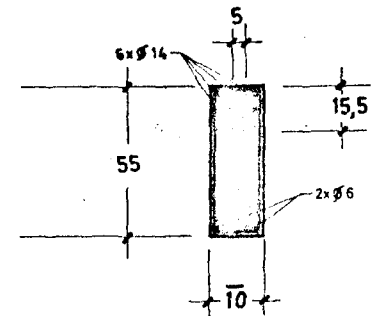
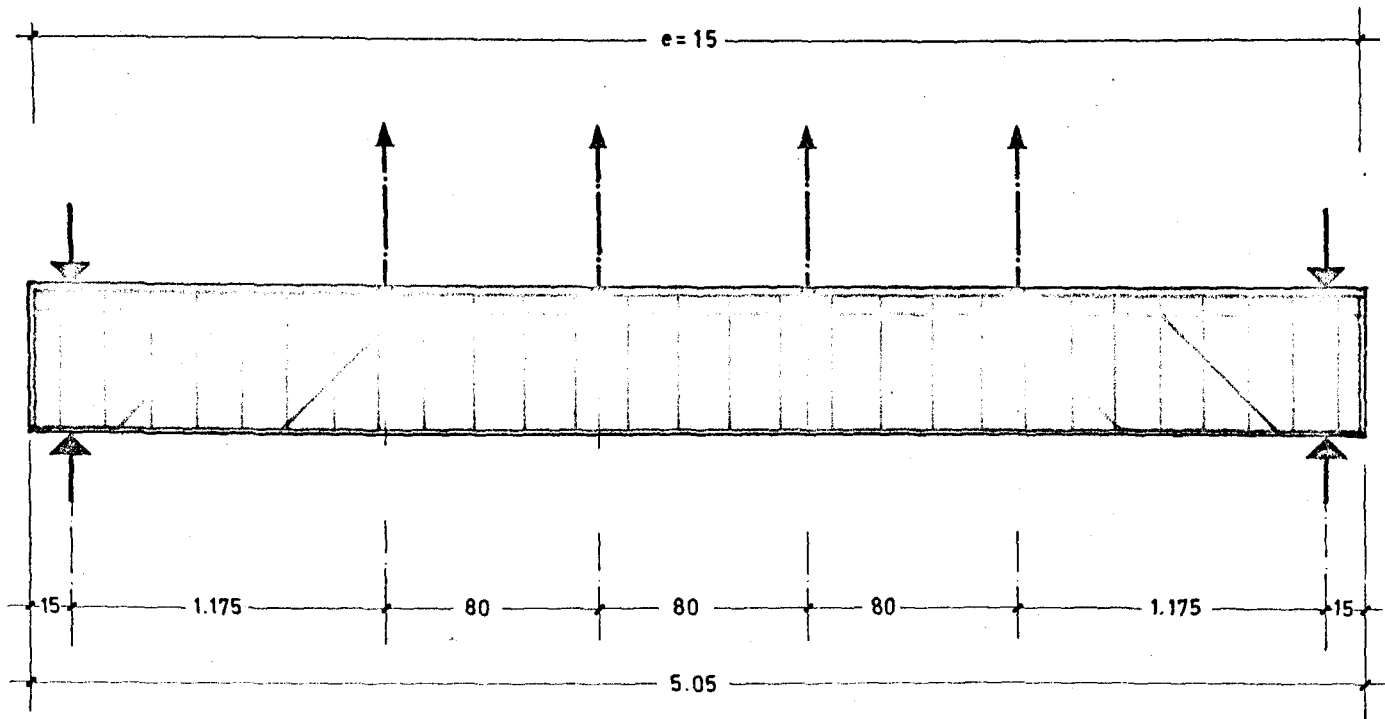
Schal- und Bewehrungsplan	Balken 7
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 2.4
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



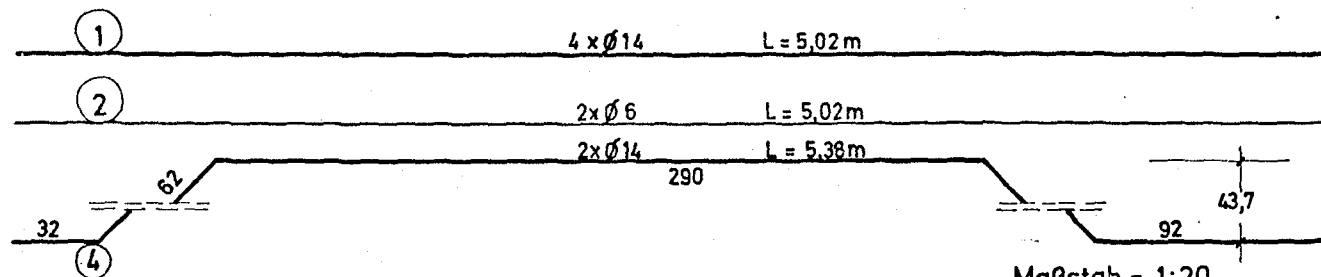
Maßstab = 1:20

Nr.	Stck.	Ø	L	L _{ges.}		
				Ø6	Ø14	Ø16
1	2	16	5,02			10,04
2	2	6	5,02	10,04		
3	35	6	0,80	28,00		
4+5		14			10,24	
L [m]				38,04	10,24	10,04
G [kg]				8	12,5	16

Schal- und Bewehrungsplan	-Balken 8
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 2.5
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

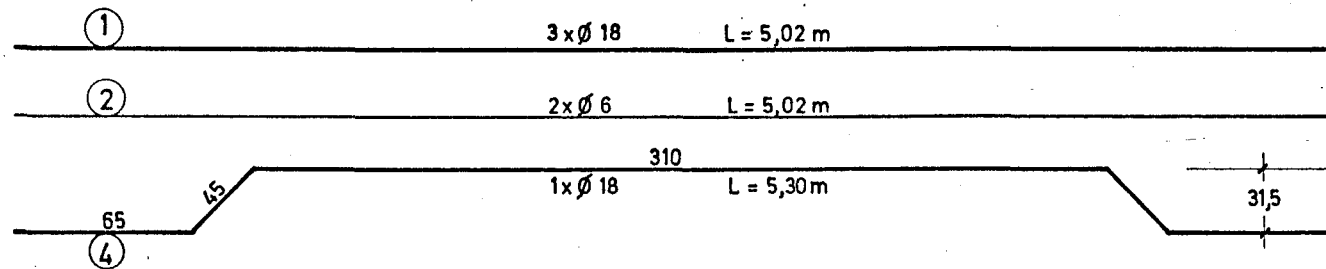
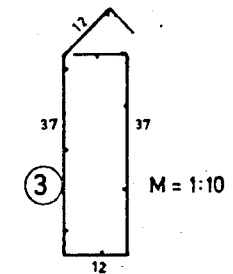
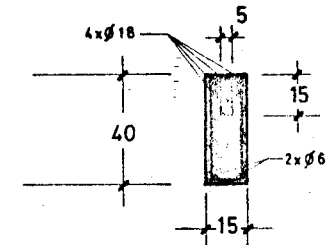
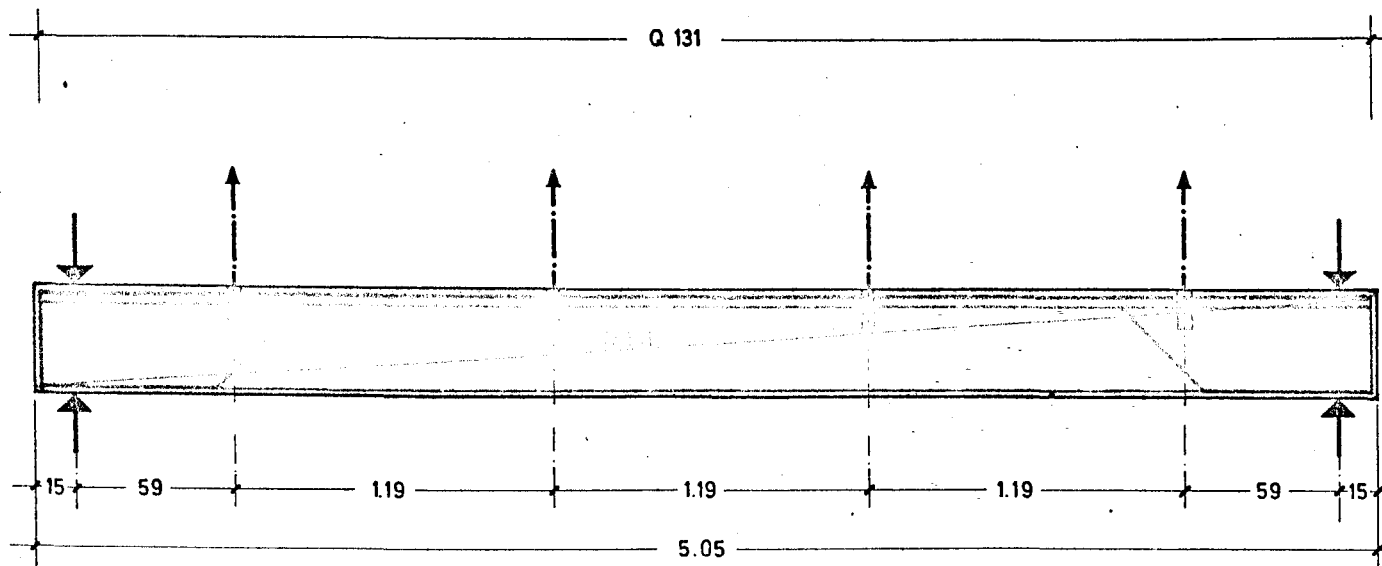


Maßstab = 1:20



Nr.	Stück	Ø	L	L ges.	
				Ø 6	Ø 14
1	4	14	5,02		20,08
2	2	6	5,02	10,04	
3	35	6	1,28	44,80	
4	2	14	5,38		10,76
L [m]				54,84	30,84
G [kg]				12,5	37,4

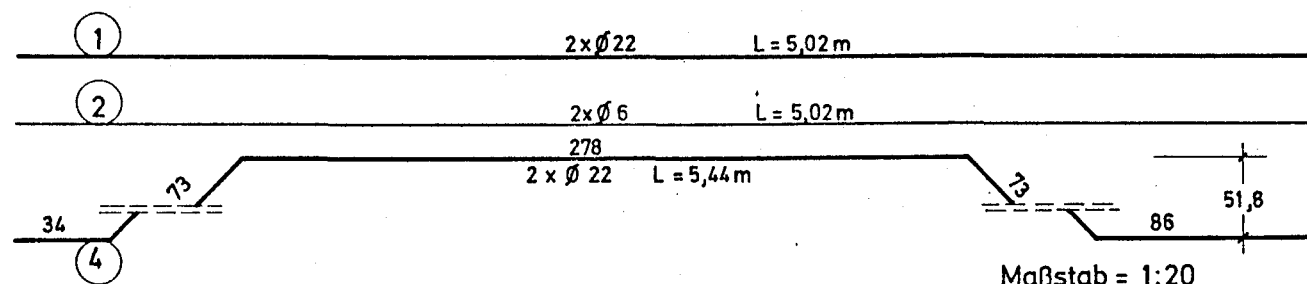
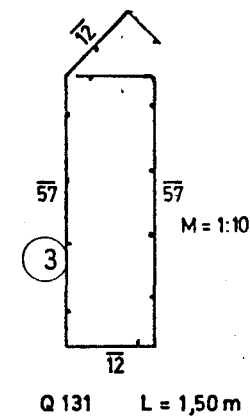
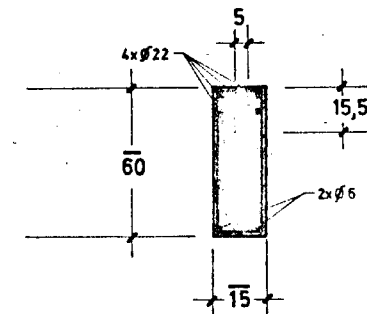
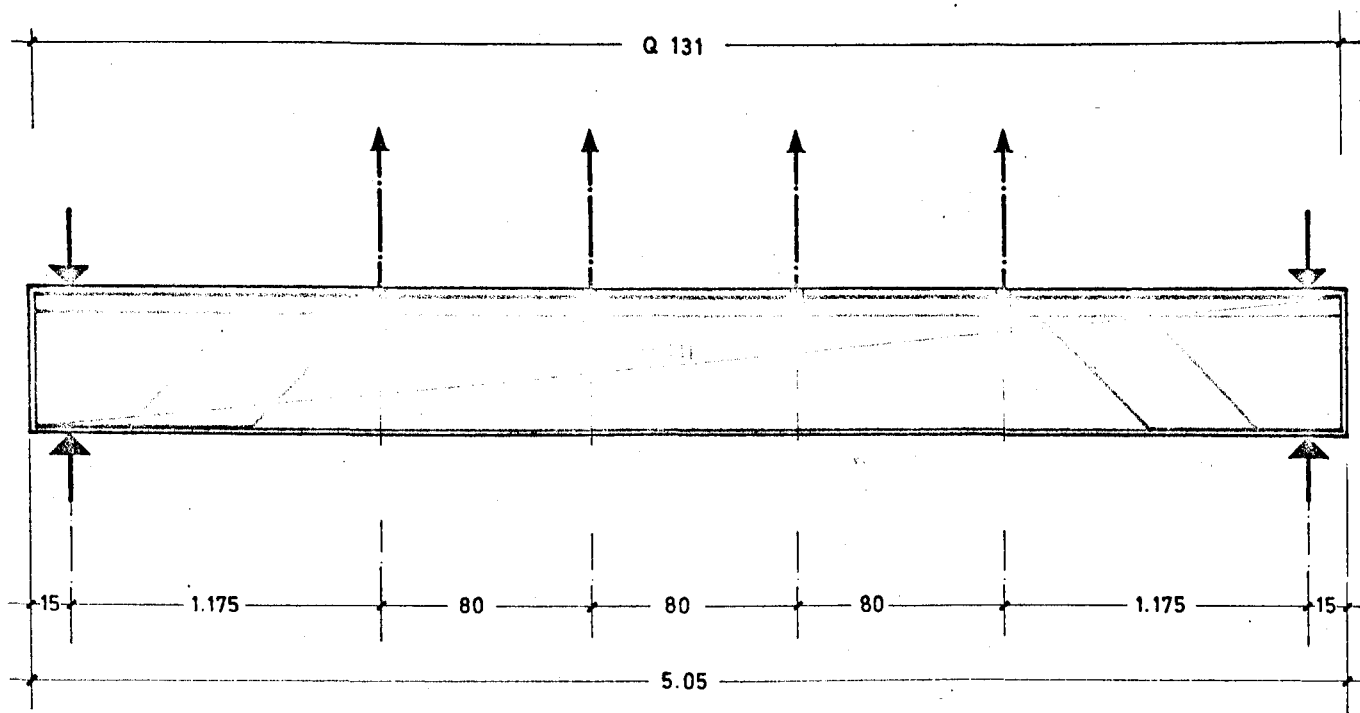
Schal- und Bewehrungsplan		Balken 9
Biegedruckzone unter Feuerangriff		Anlage 2.6
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig		
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen		



M = 1:20

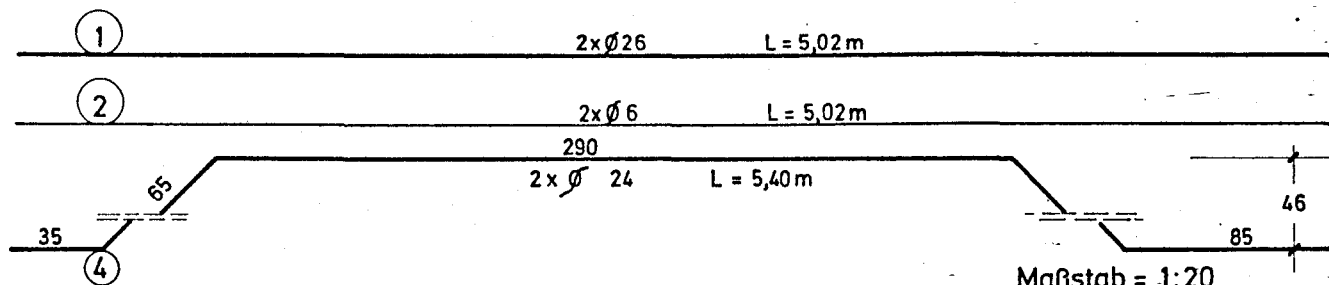
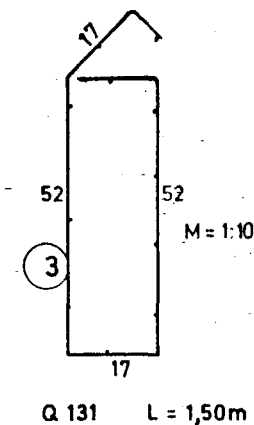
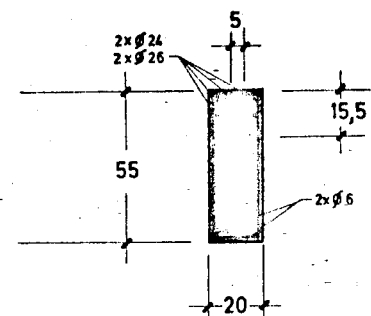
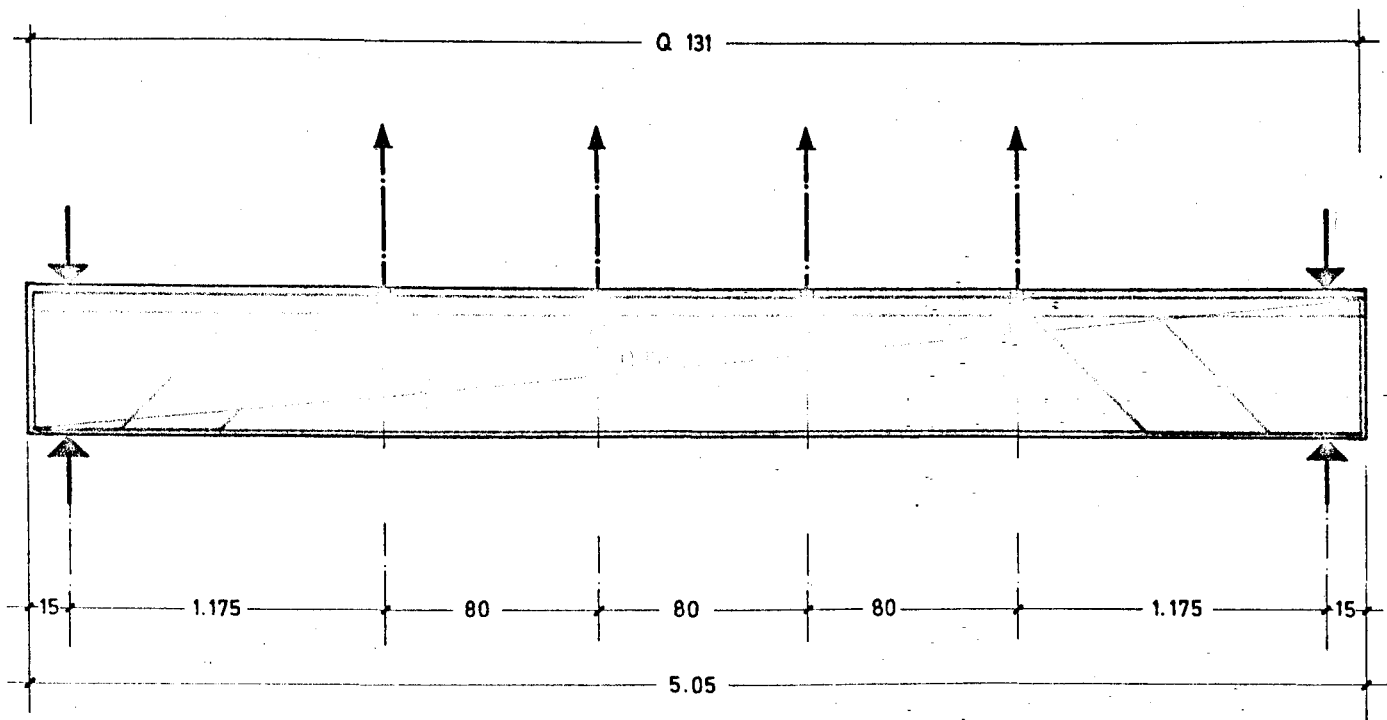
Nr.	Stck	Ø	L	L _{ges.}		
				Ø 6.	Q 131	Ø 18
1	3	18	5,02	10,04	5,02	15,06
2	2	6	5,02			
3	Q 131	18	1,10			5,30
4			5,30			
L [m]				10,04	5,02	20,36
G [kg]				2,5	11	41

Schal - und Bewehrungsplan	Balken 10
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 2.7.
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



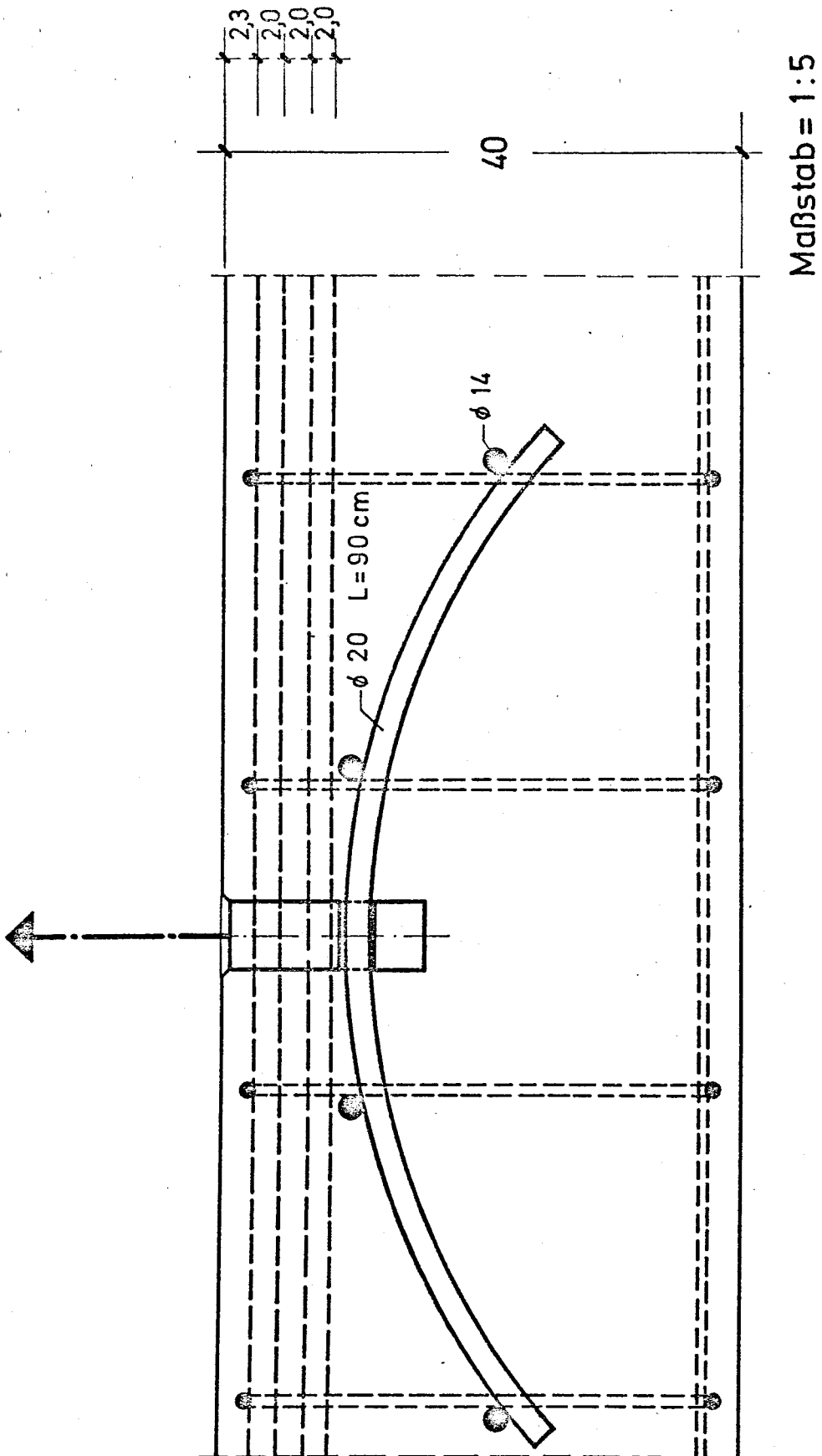
Nr.	Stck	Ø	L	L _{ges.}		
				Ø 6	Q 131	Ø 22
1	2	22	5,02			10,04
2	2	6	5,02	10,04		
3	2	Q 131	1,50		5,02	
4	2	22	5,44			10,88
L [m]				10,04	5,02	20,92
G [kg]				2,5	15,0	63

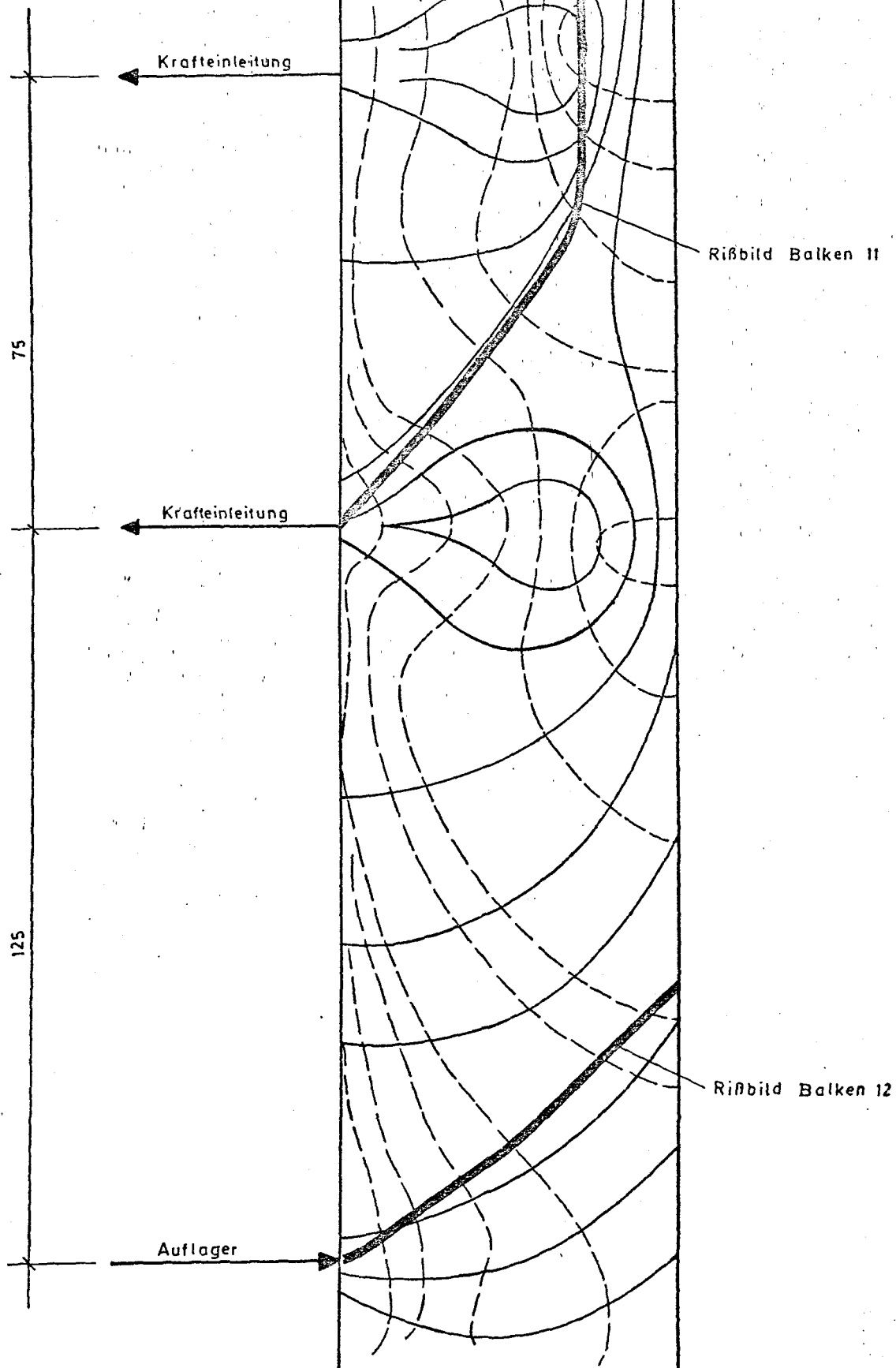
Schal-und Bewehrungsplan	Balken 11
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 2.8
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	



Nr.	Stck	Ø	L	L ges.			
				Ø 6	Q 131	Ø 24	Ø 26
1	2	26	5,02	10,04	5,02	10,80	10,04
2	2	6	5,02				
3	Q 131		1,50				
4	2	24	5,40				
L [m]				10,04	5,02	10,80	10,04
G [kg]				2,5	14,5	40	42

Schal-und Bewehrungsplan	Balken 12
Biegedruckzone unter Feuerangriff	Anlage 2.9
Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau Technische Universität Braunschweig Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen	

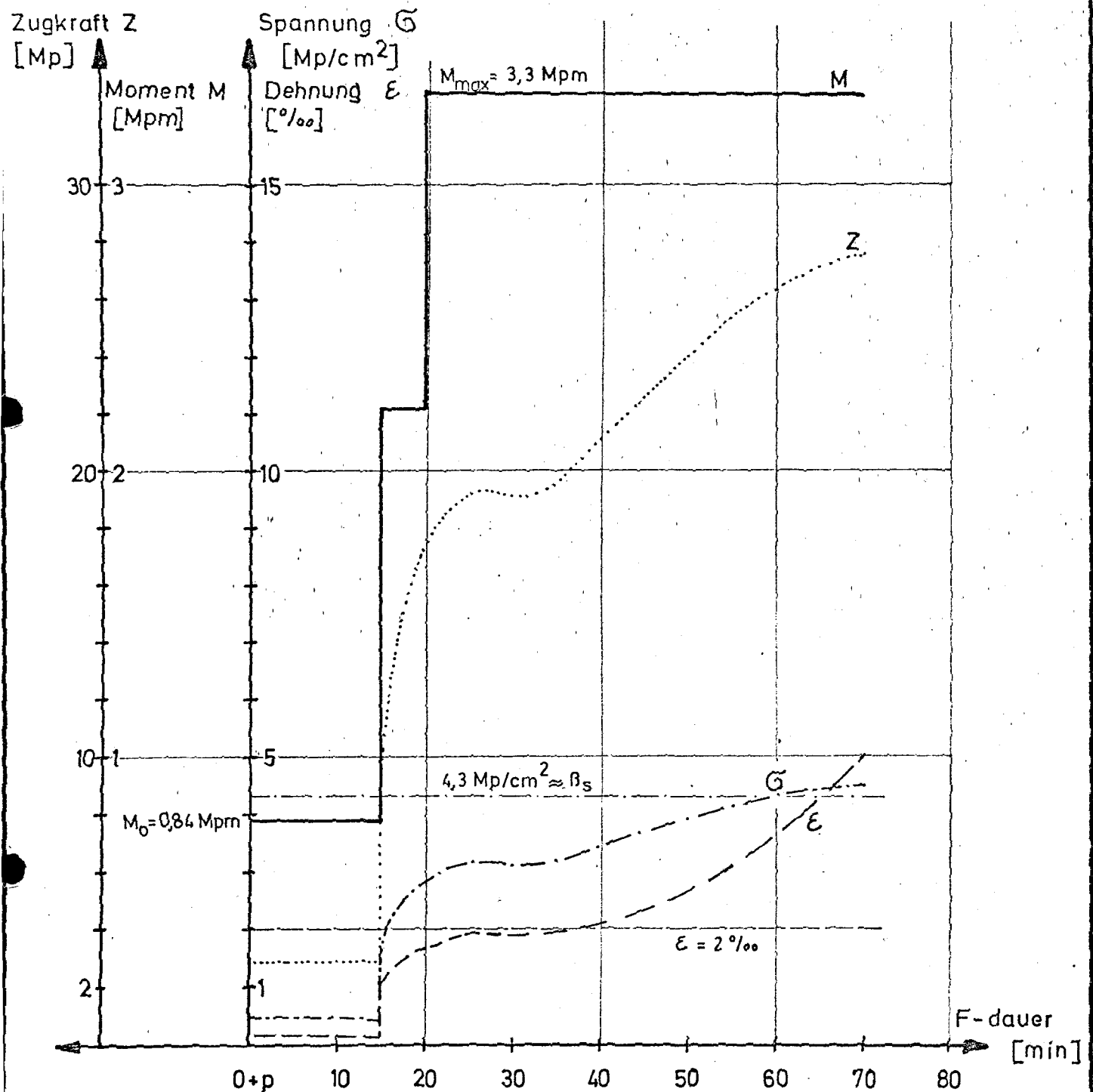




Spannungstrajektorien Balken 11 und 12
und Rißbilder (s. auch Bild 11 und 13)

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen
<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201905141322-0>

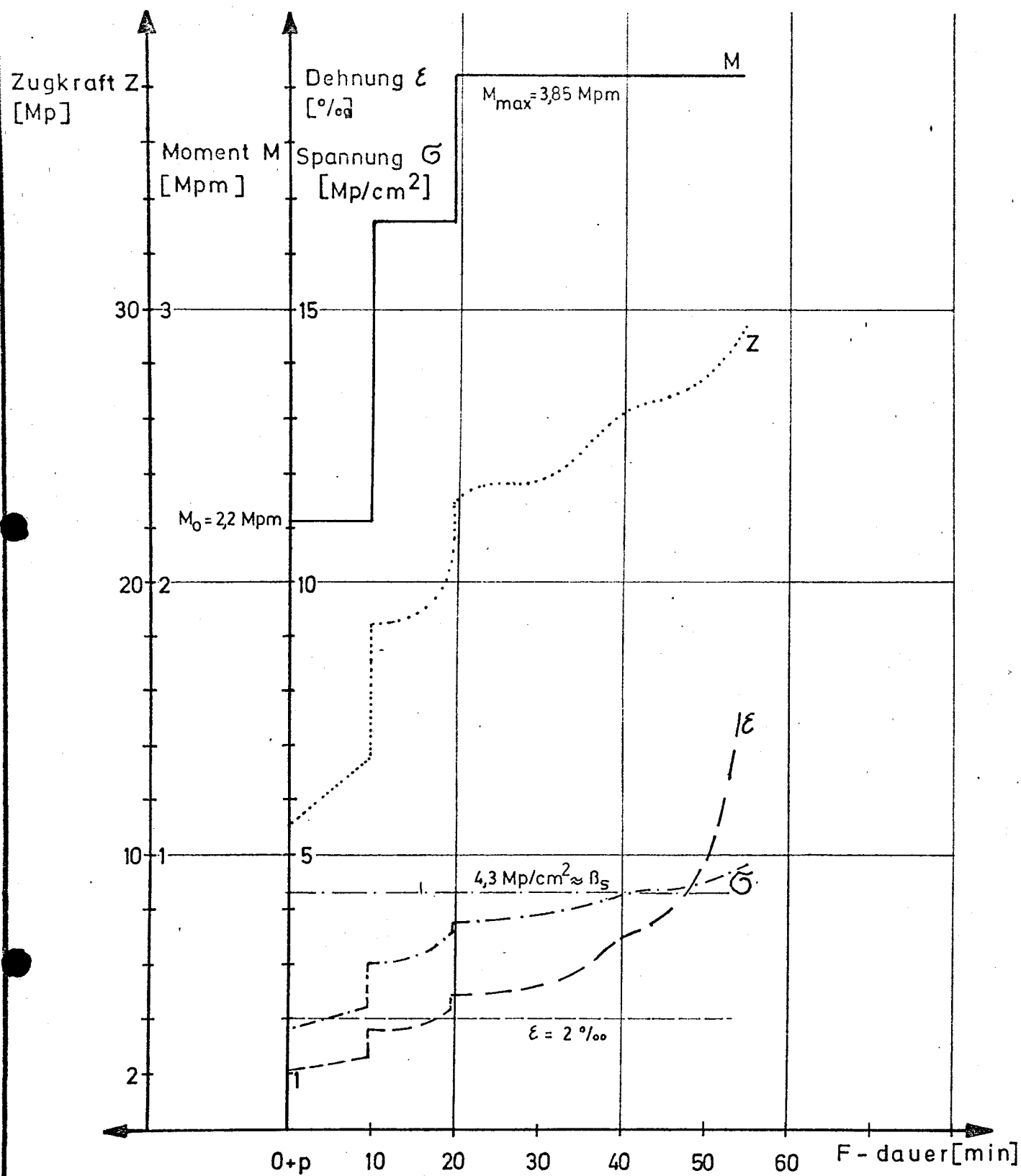
Anlage 4



Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängig-
keit von der Branddauer

Balken 1

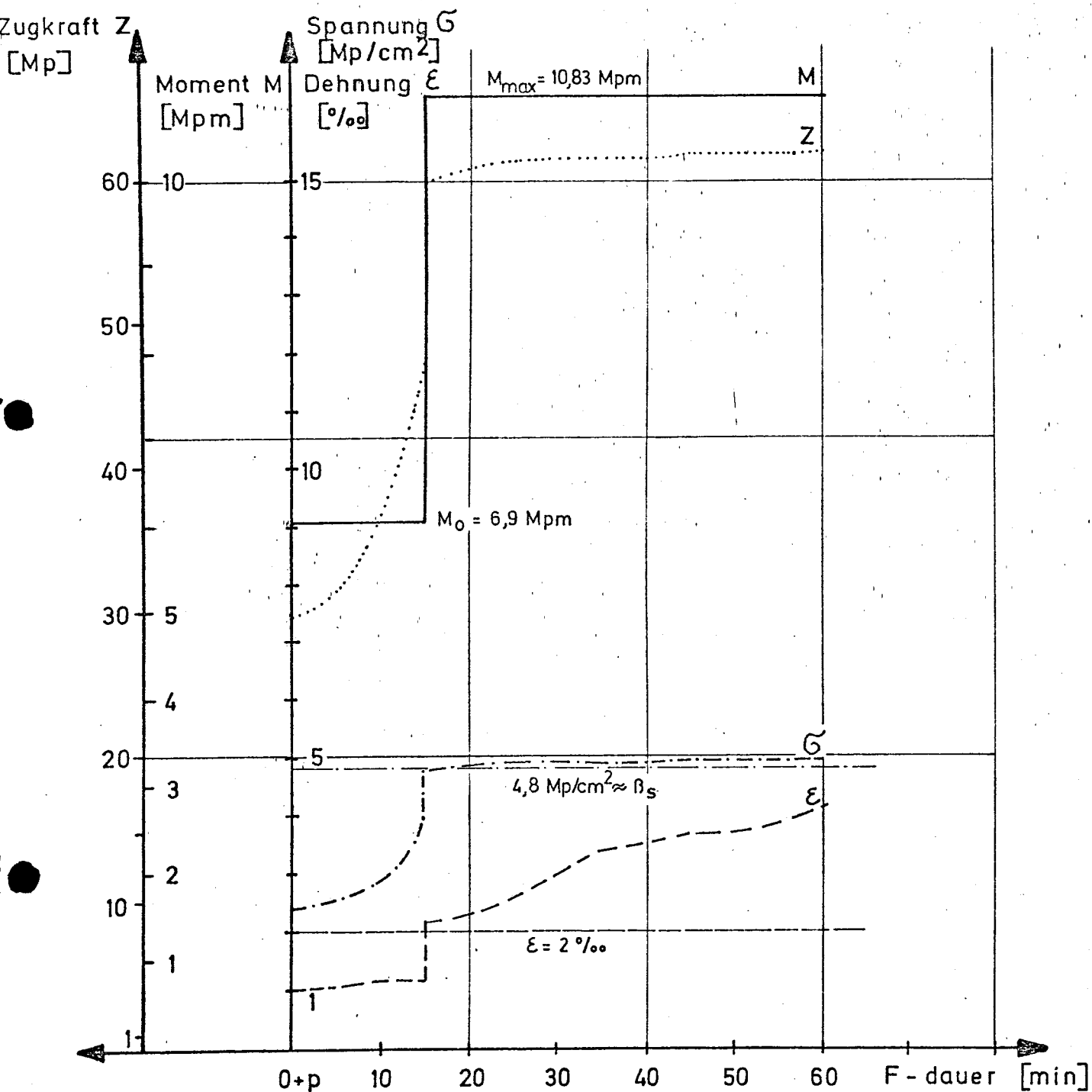
Anlage 5.1



Balken 2

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängig-
keit von der Branddauer

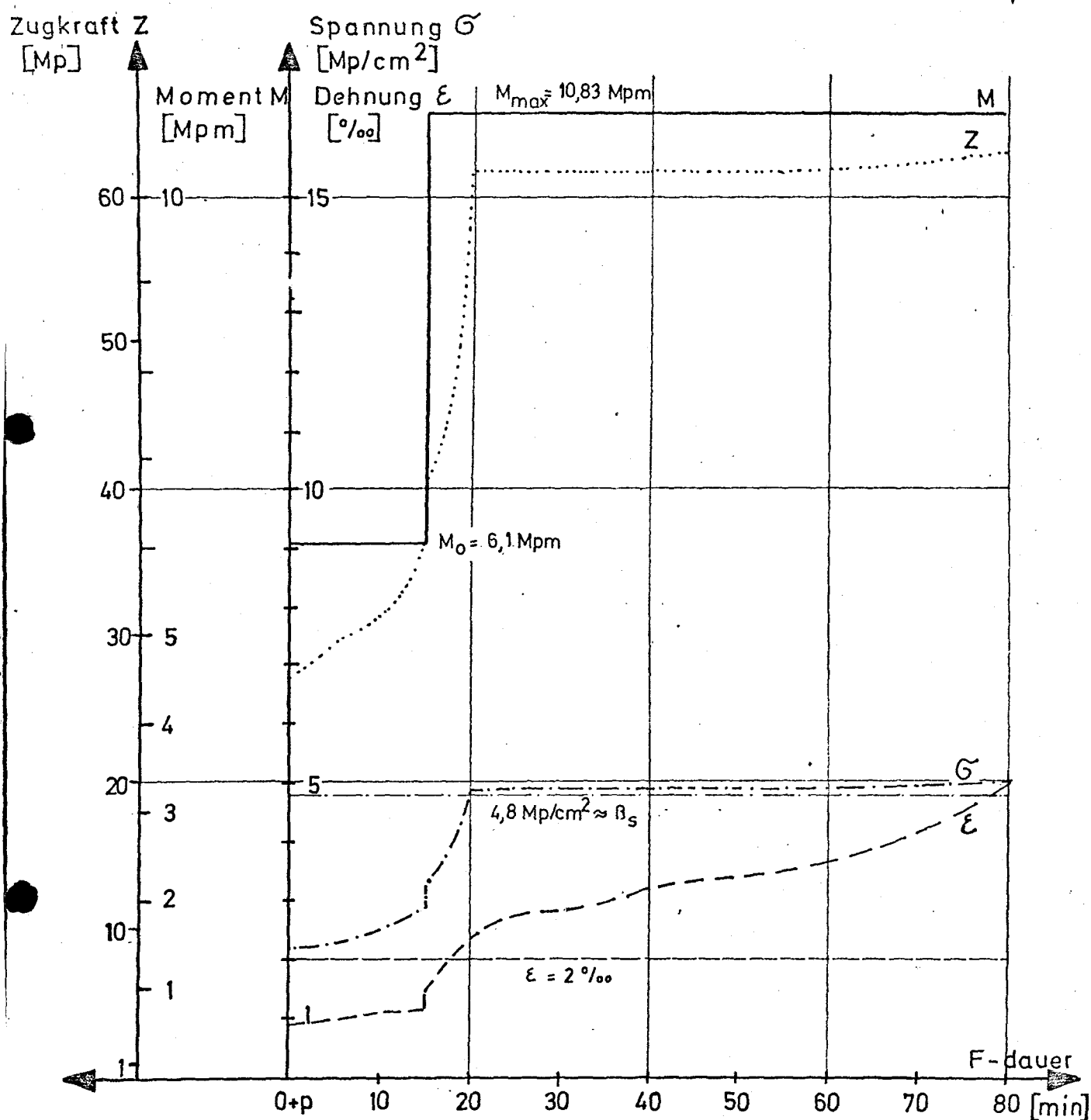
Anlage 5.2



Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängigkeit von der Branddauer

Balken 3

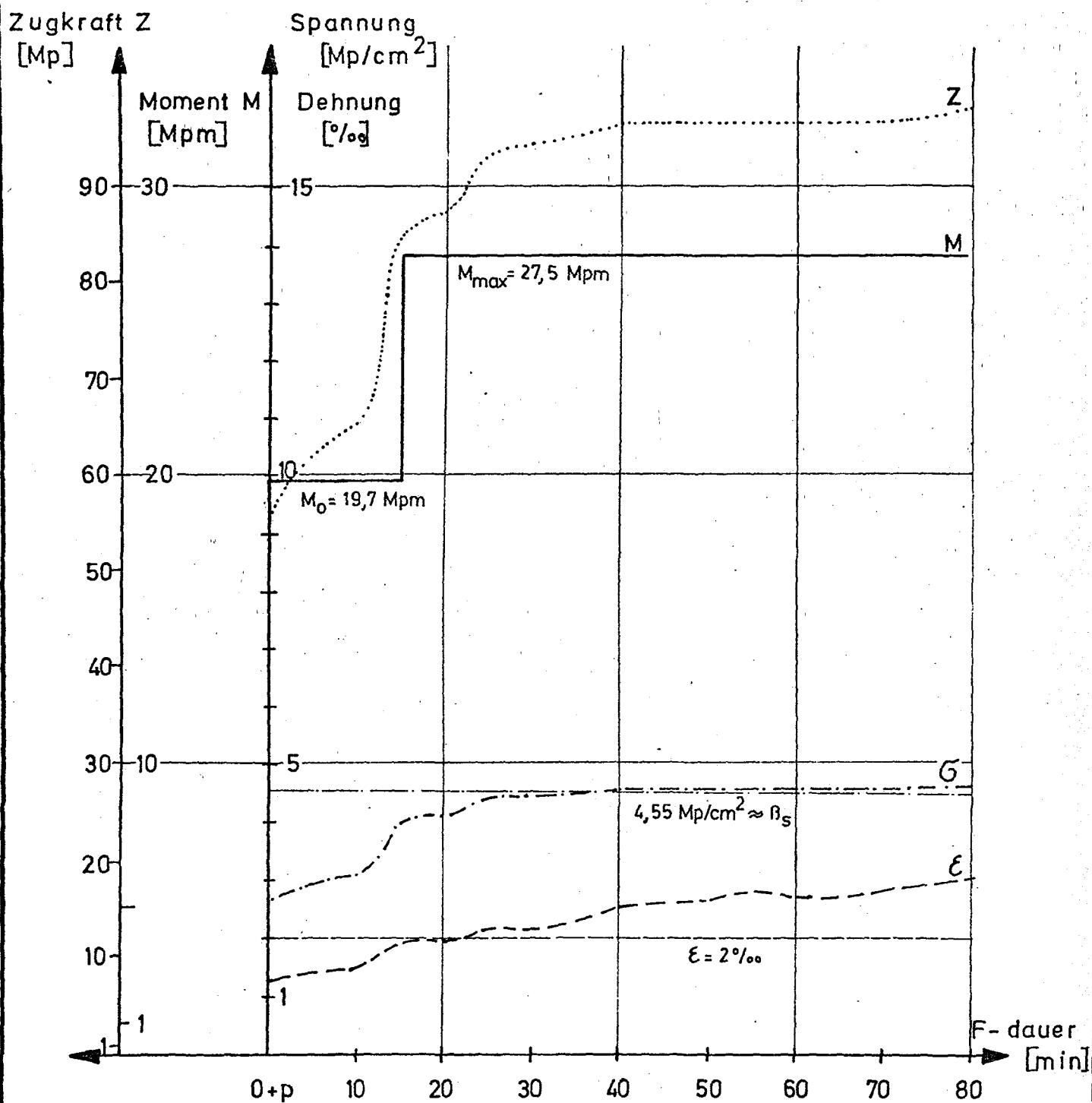
Anlage 5.3



Balken 4

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängig-
keit von der Branddauer

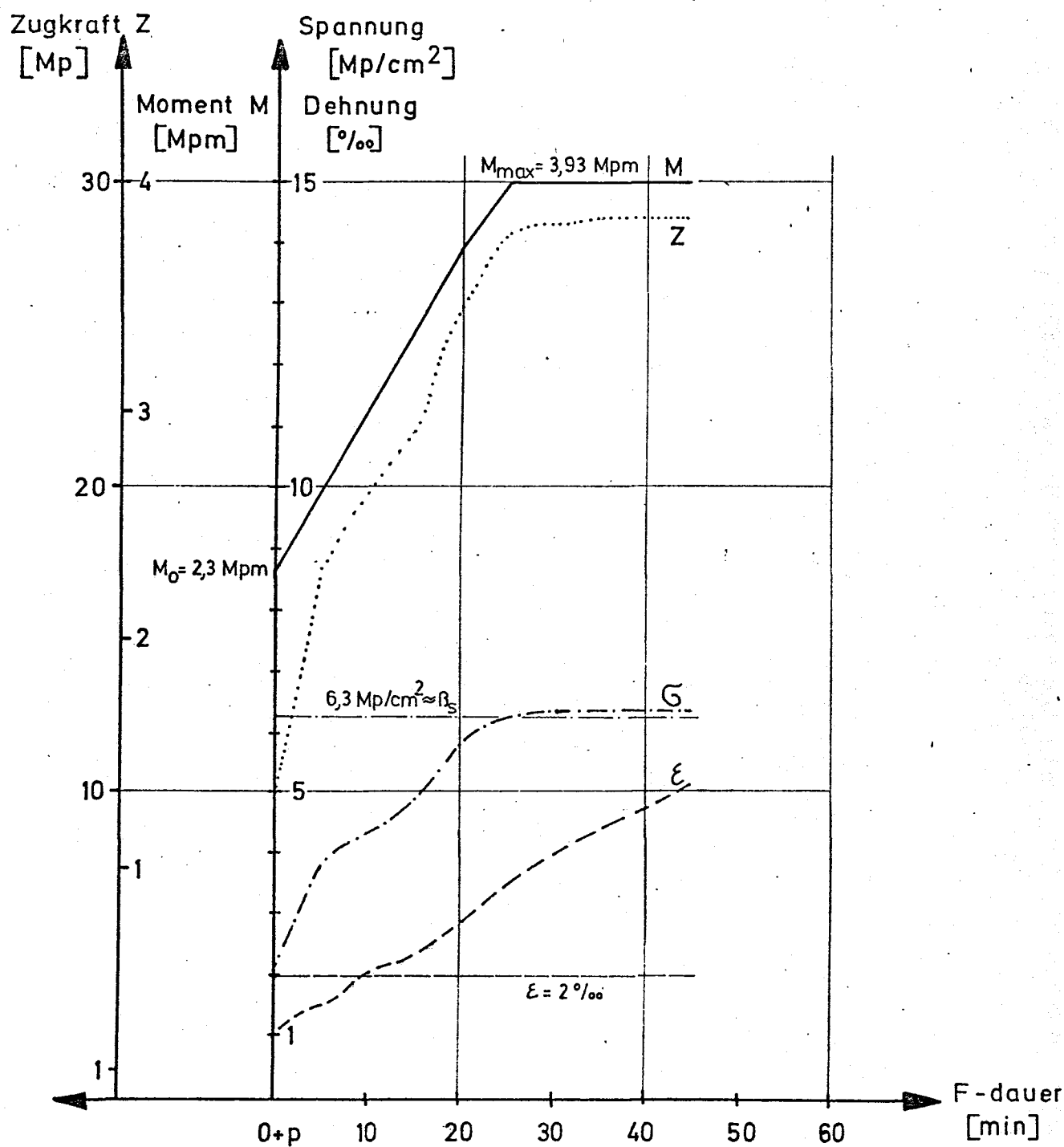
Anlage 5.4



Balken 5

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung,
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängig-
keit von der Branddauer

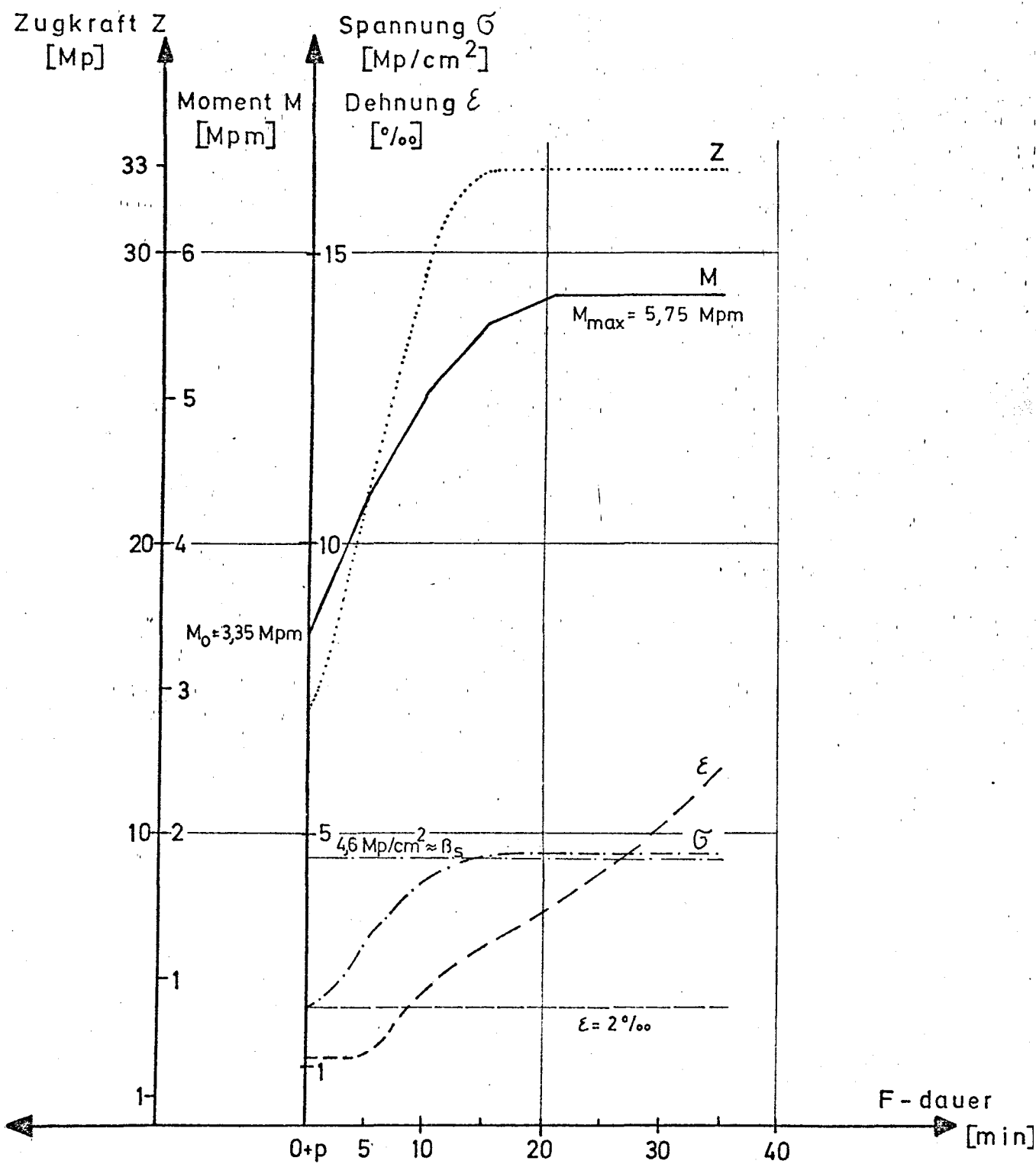
Anlage 5.5



Balken 7

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängig-
keit von der Branddauer

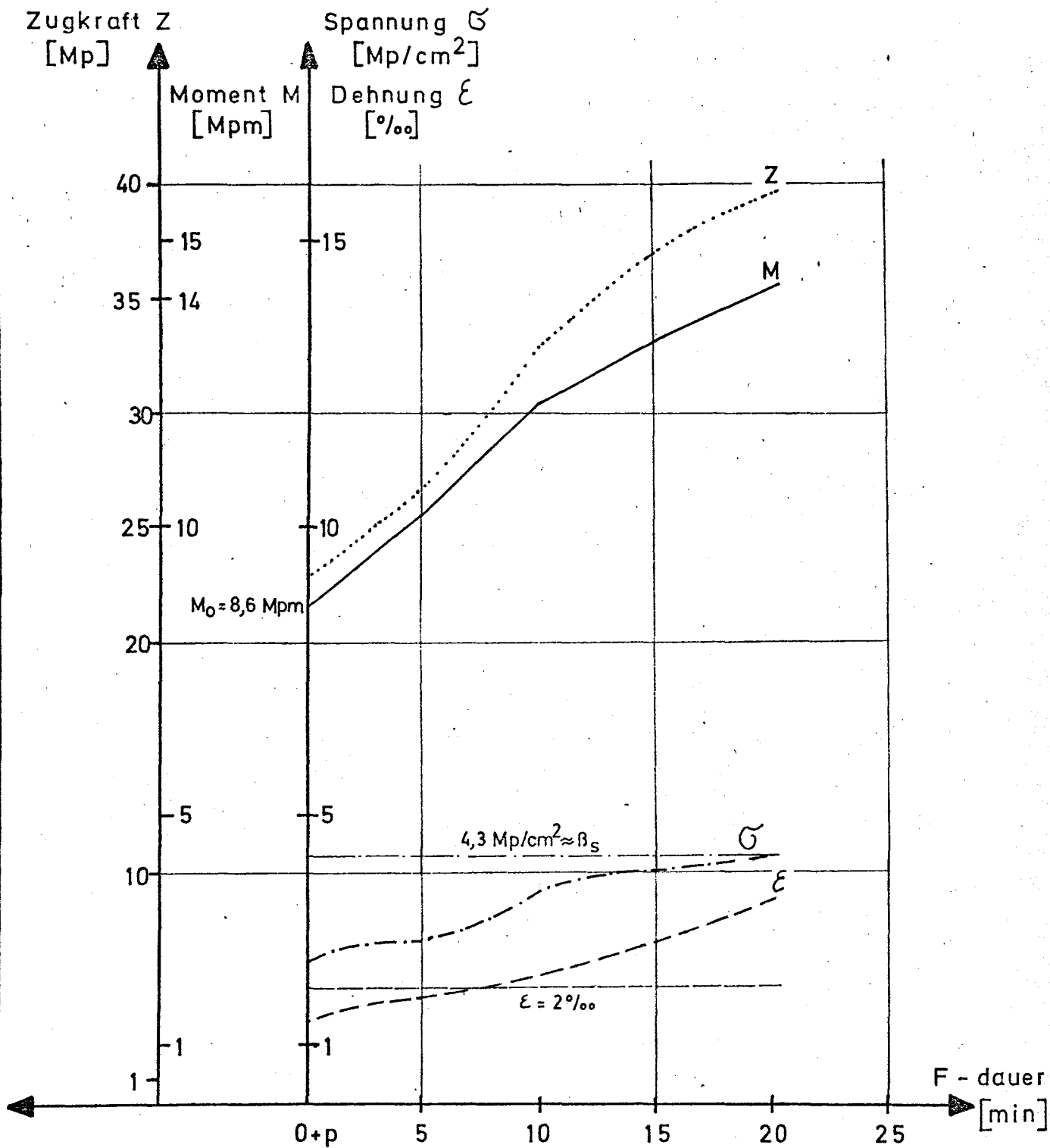
Anlage 5.6



Balken 8

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängig-
keit von der Branddauer

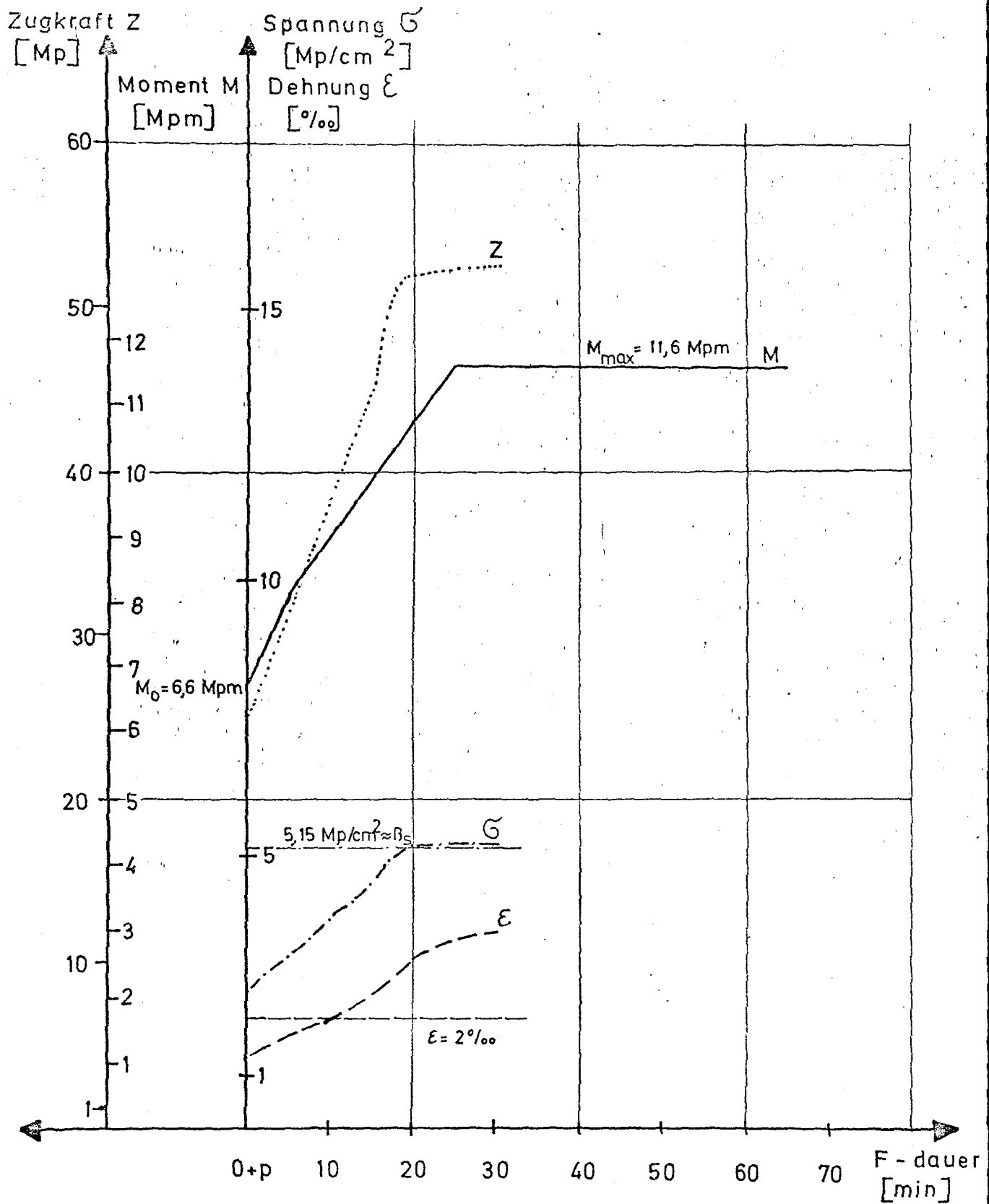
Anlage 5.7



Balken 9

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängig-
keit von der Branddauer

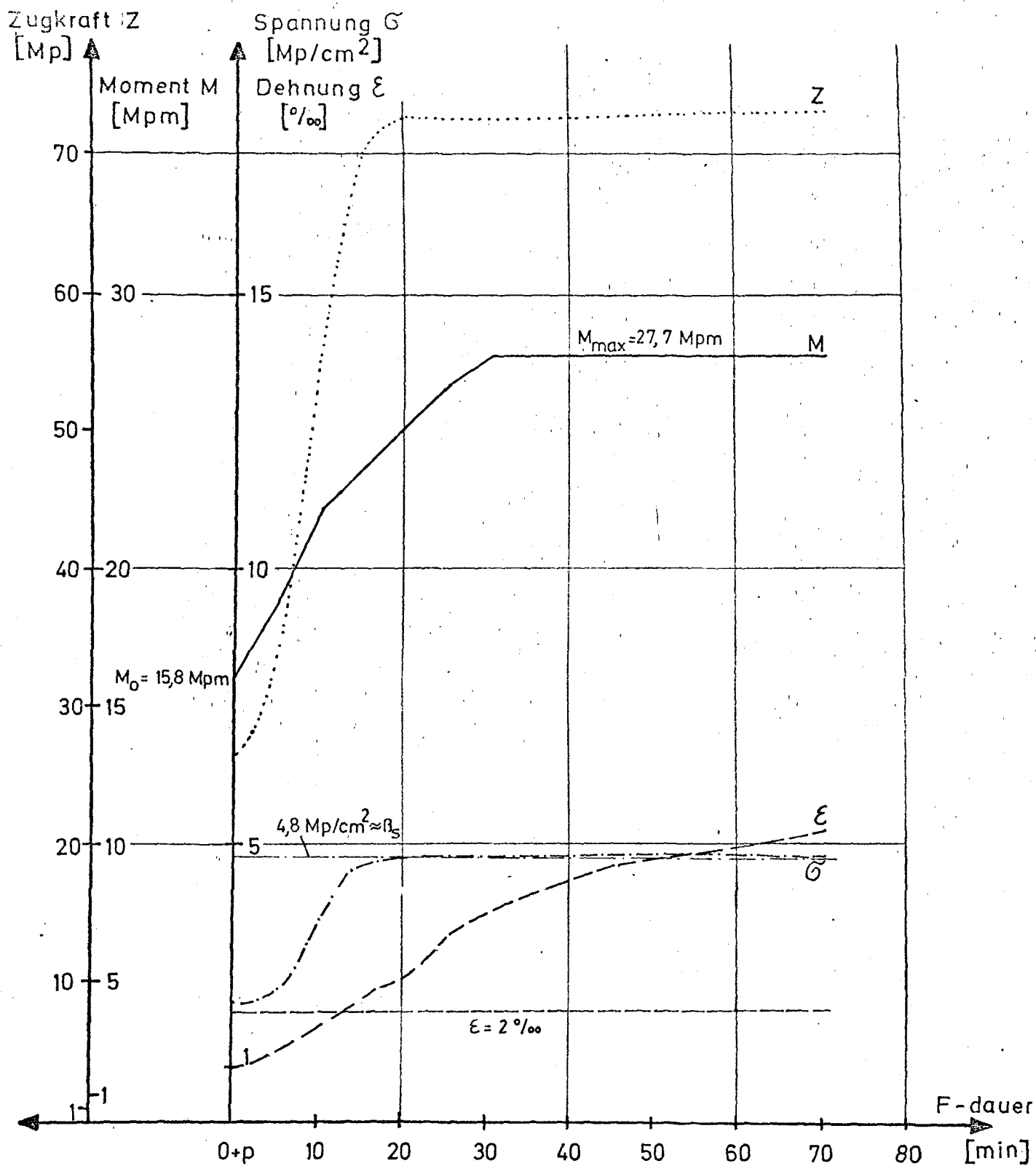
Anlage 5.8



Balken 10

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängig-
keit von der Branddauer

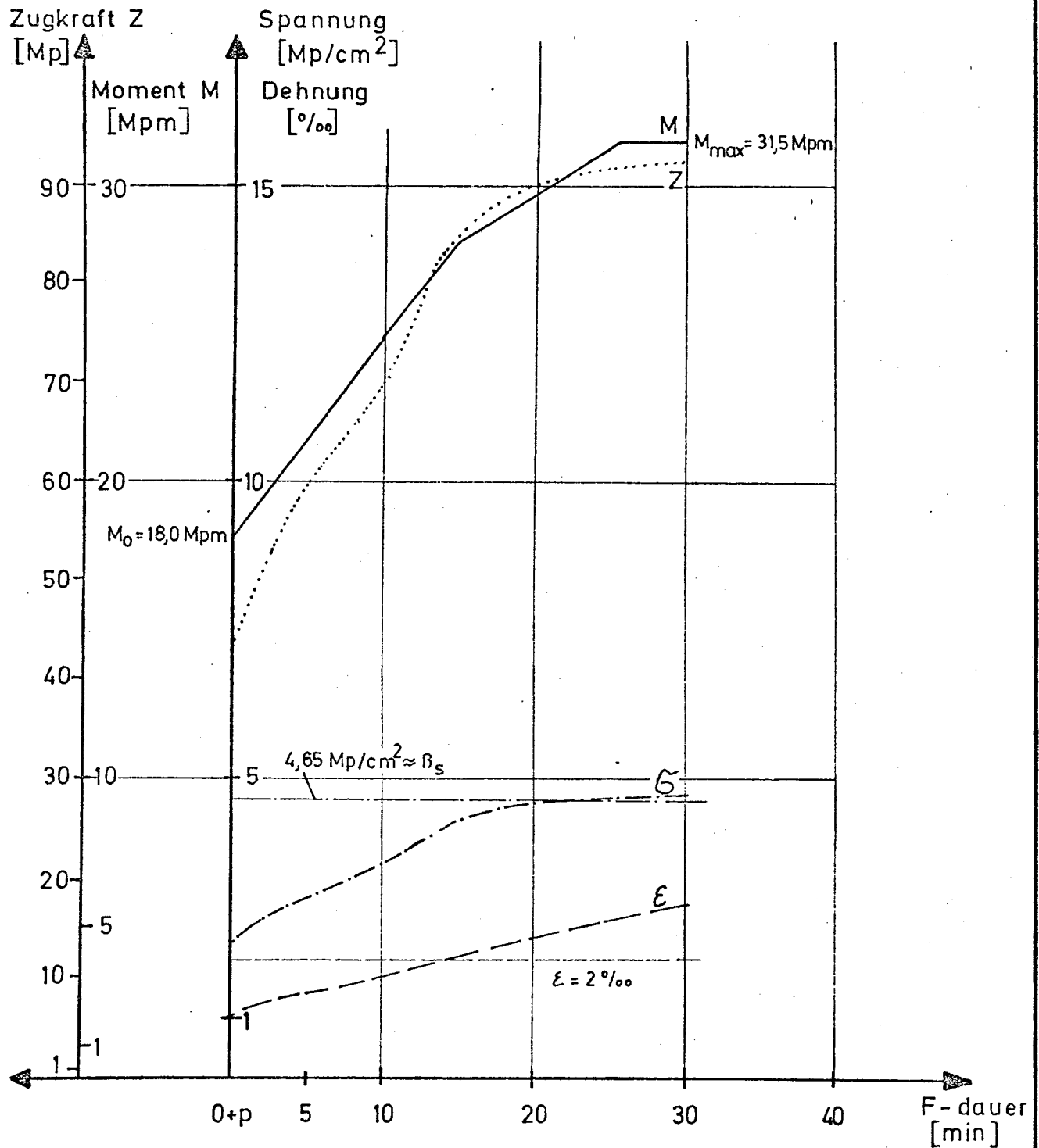
Anlage 5.9



Balken 11

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung
sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängigkeit
von der Branddauer

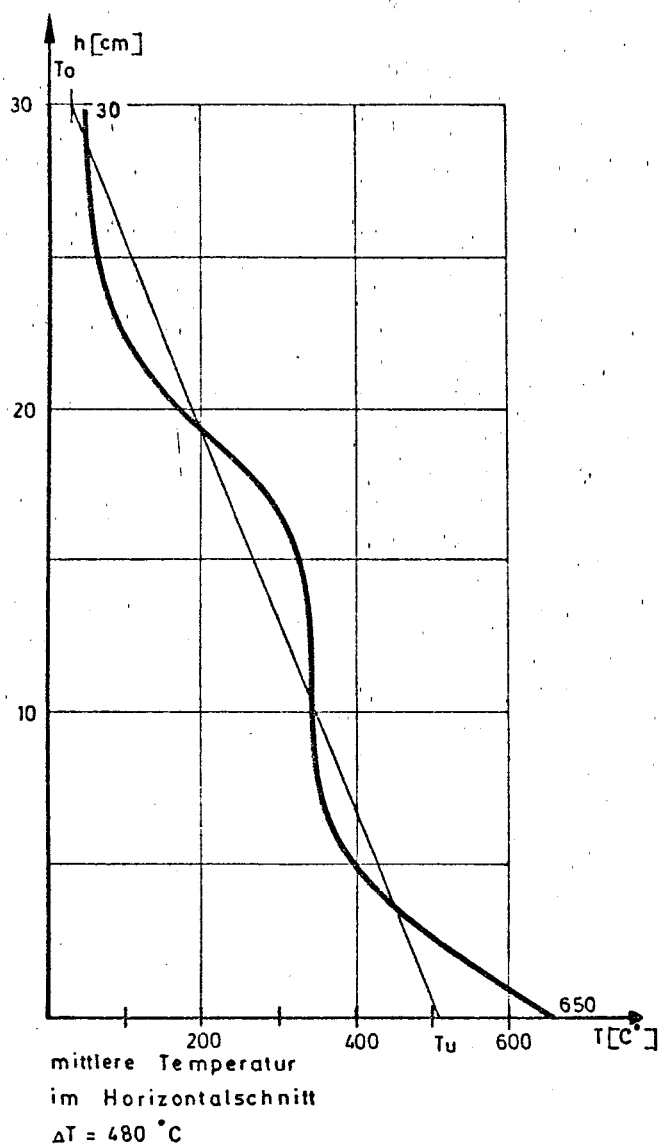
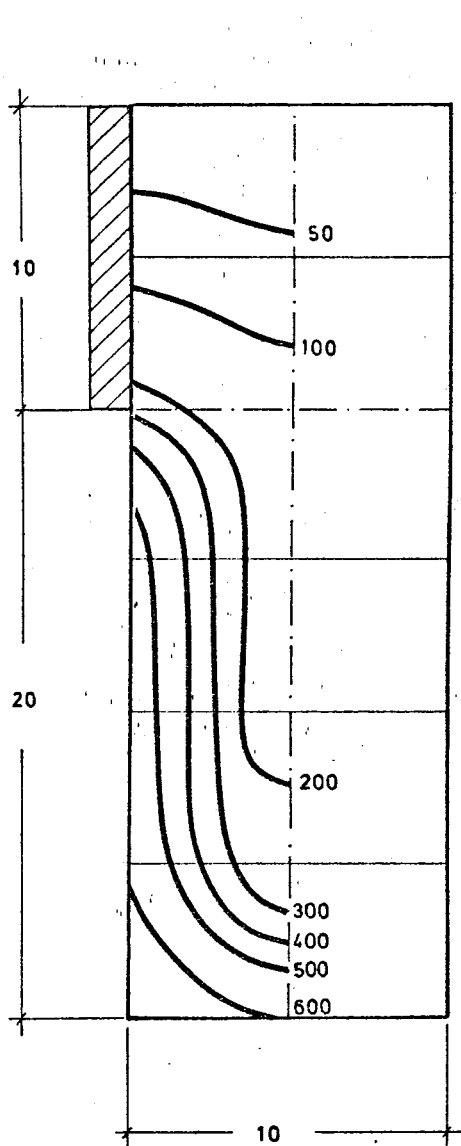
Anlage 5.10



Balken 12

Stahlspannung und Dehnung der Biegezugbewehrung sowie Zugkraft und Momentenverlauf in Abhängigkeit von der Branddauer

Anlage 5.11

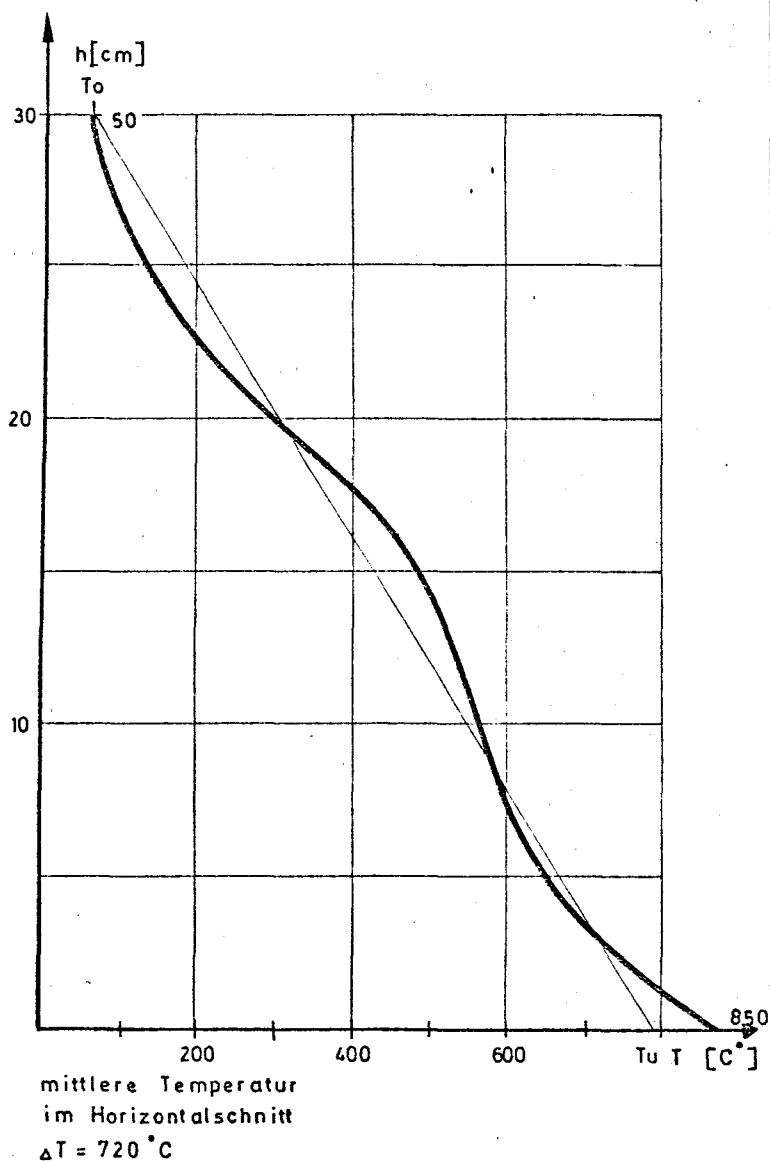
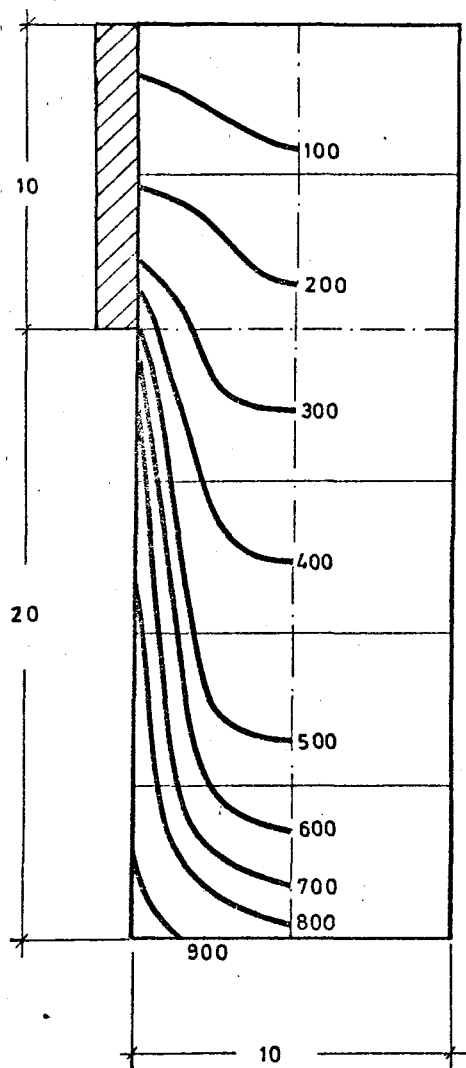


Temperaturfeld Balken 1,2,7

Beanspruchungsdauer 30 Minuten

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfstatt für das Bauwesen

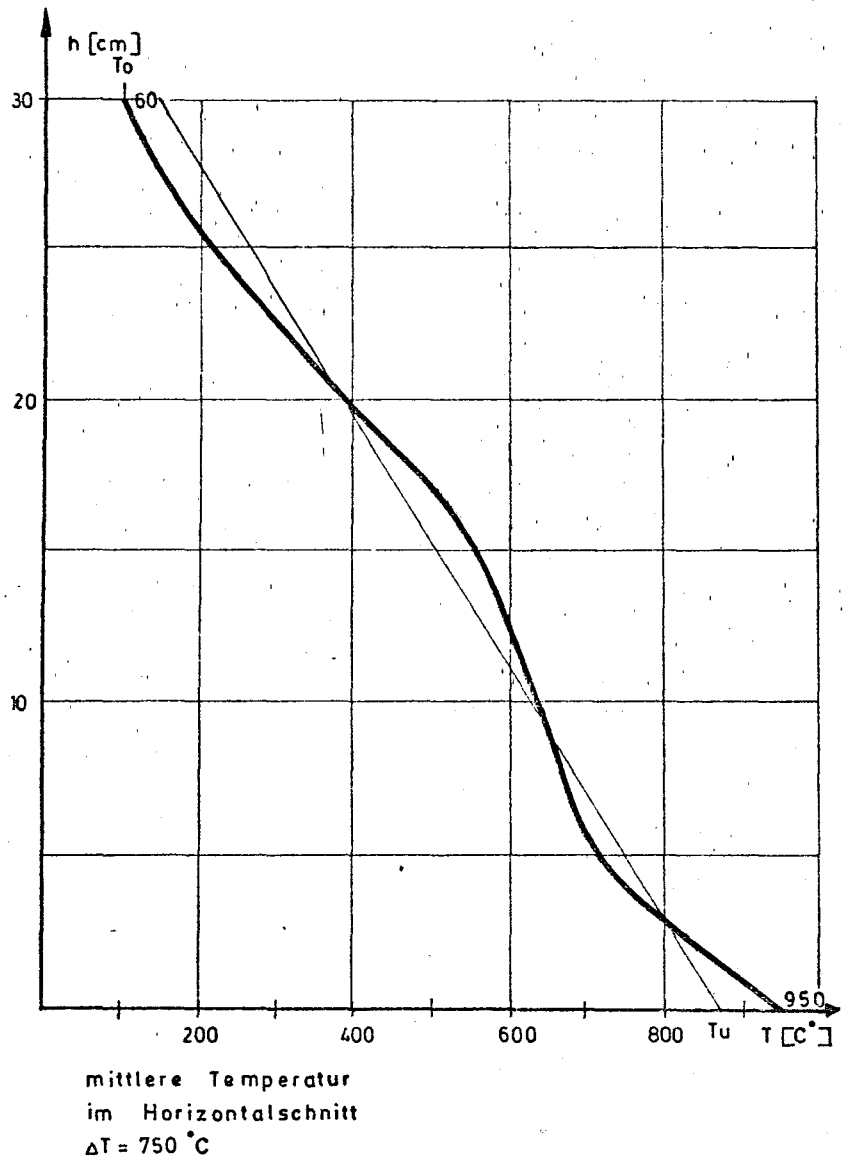
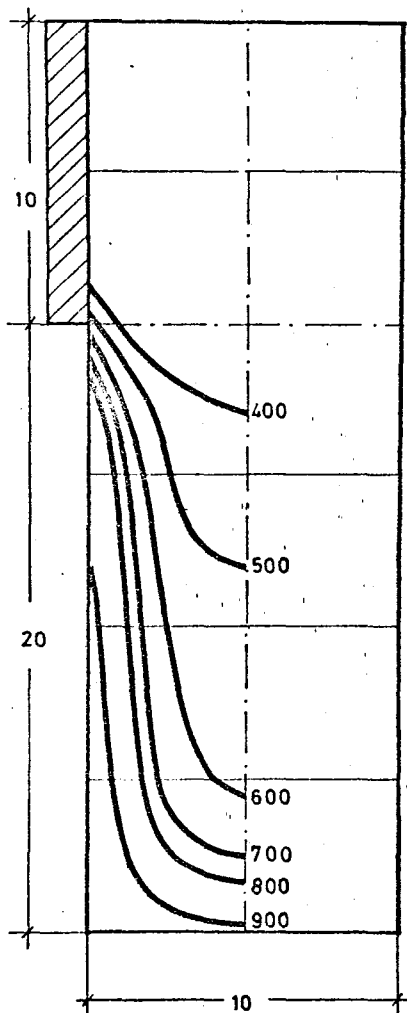
Anlage 6.1



Temperaturfeld Balken 1, 2, 7
Beanspruchungsdauer 60 Minuten

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

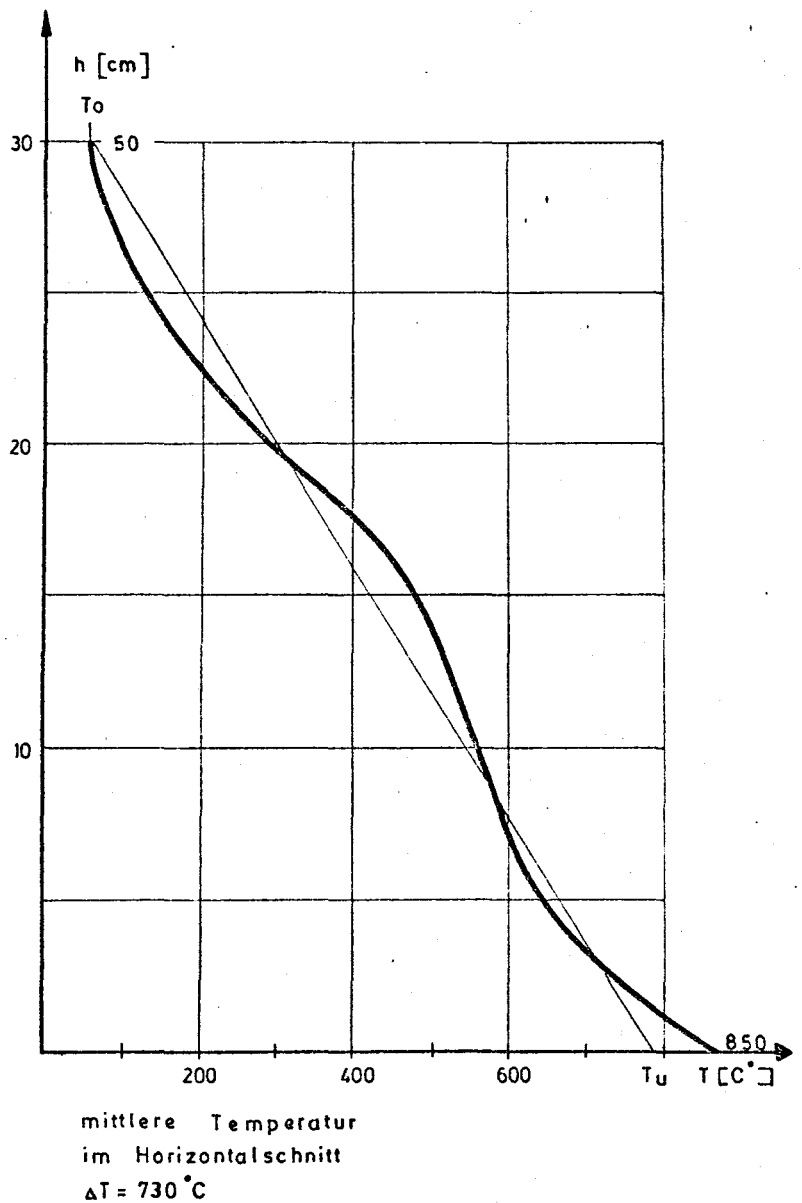
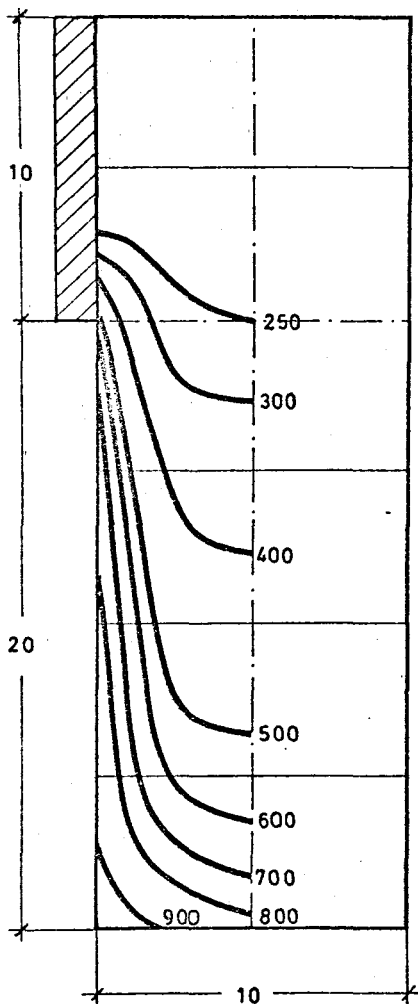
Anlage 6.2



Temperaturfeld Balken 1
Versagenszeitpunkt (73 Min.)

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

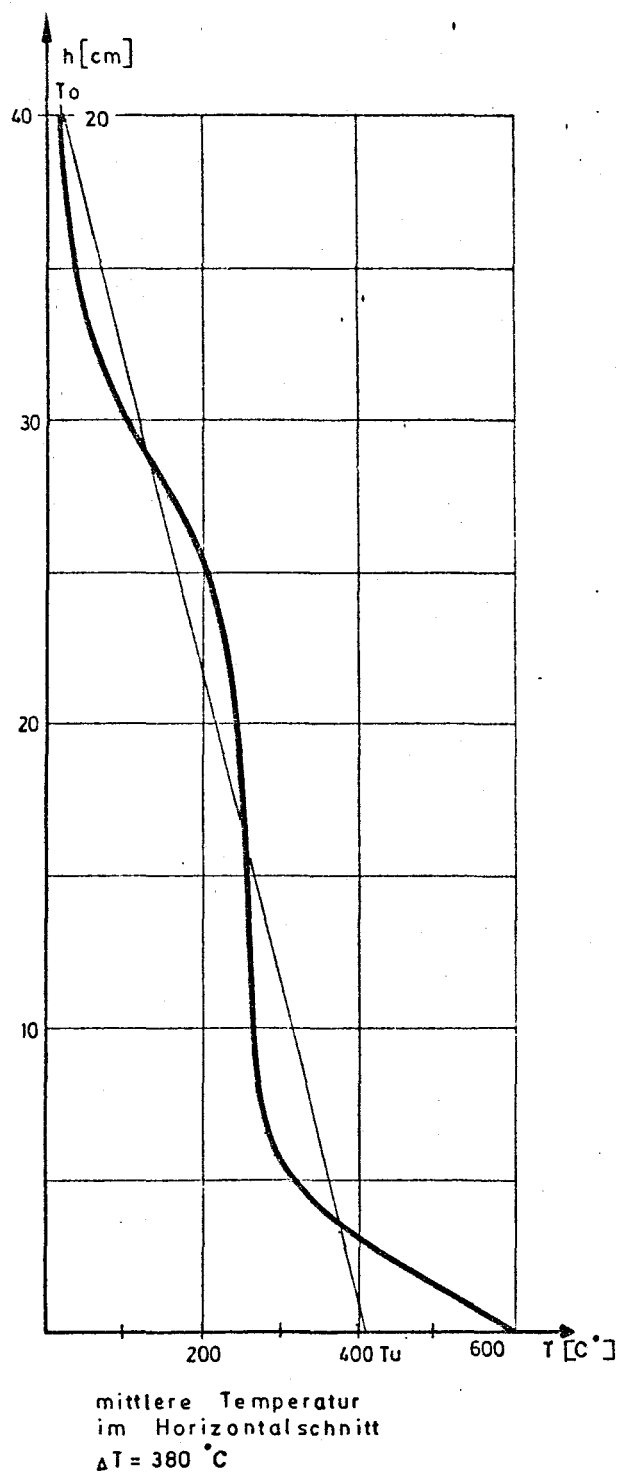
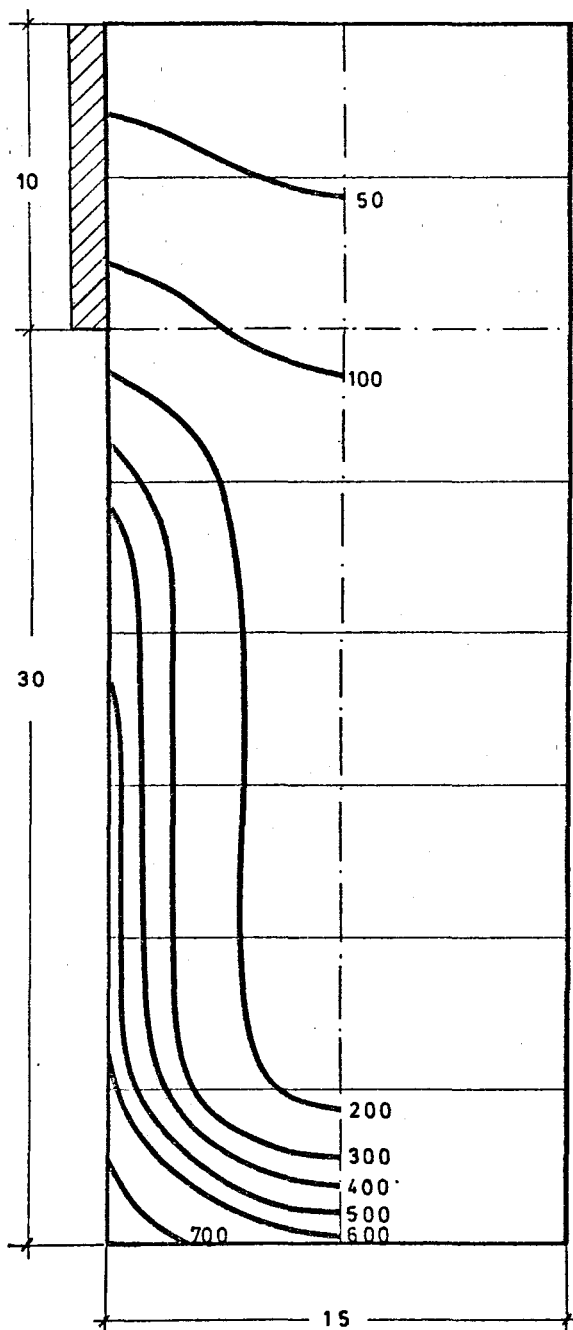
Anlage 6.3



Temperaturfeld Balken 2
Versagenszeitpunkt (62 Min.)

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 6.4

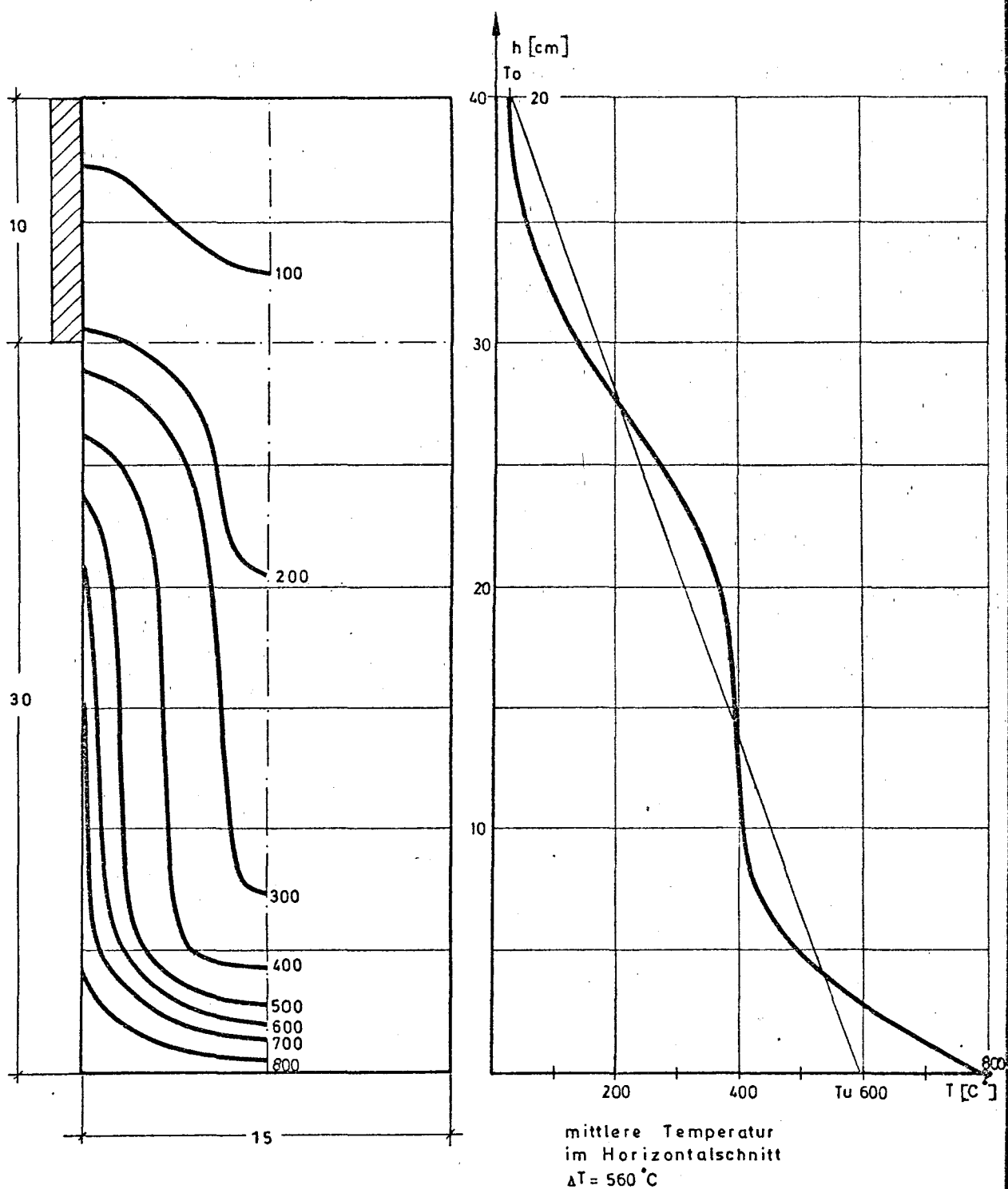


Temperaturfeld Balken 3,4,10
Beanspruchungsdauer 30 Minuten

Anlage 6.5

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

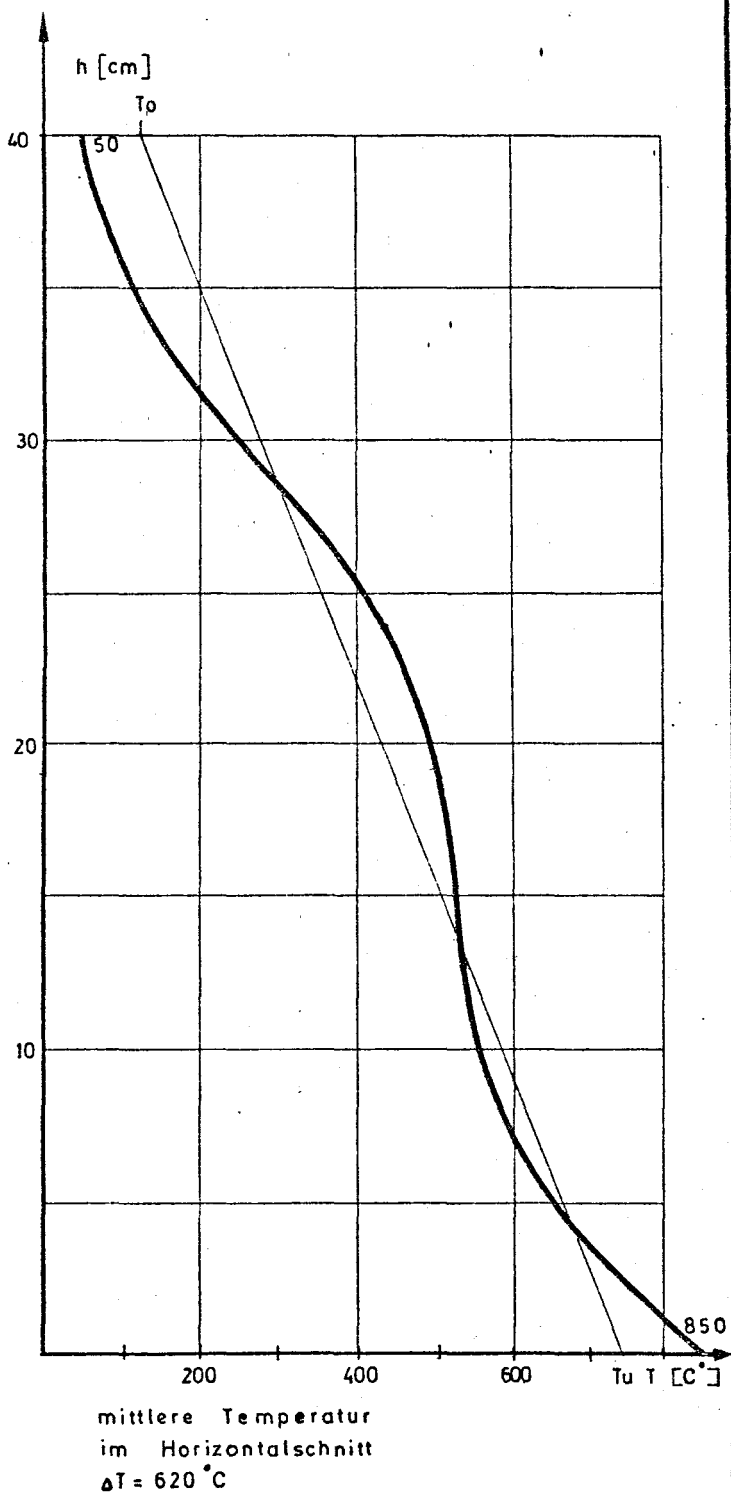
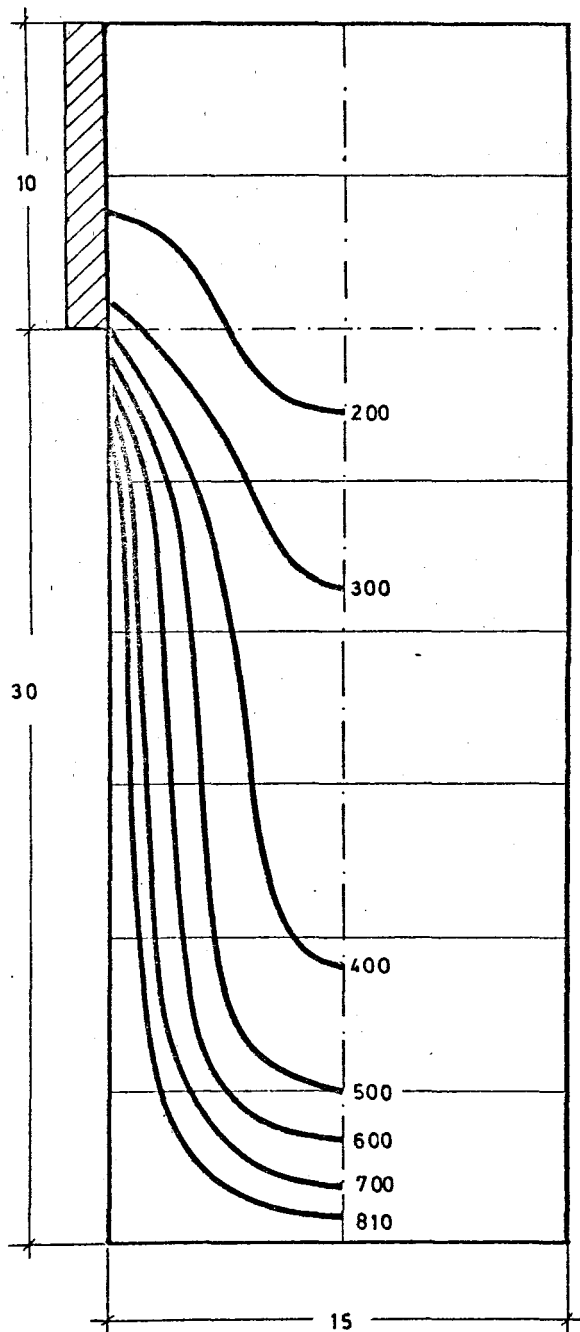
<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201905141322-0>



Temperaturfeld Balken 3, 4, 10
Beanspruchungsdauer 60 Minuten

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

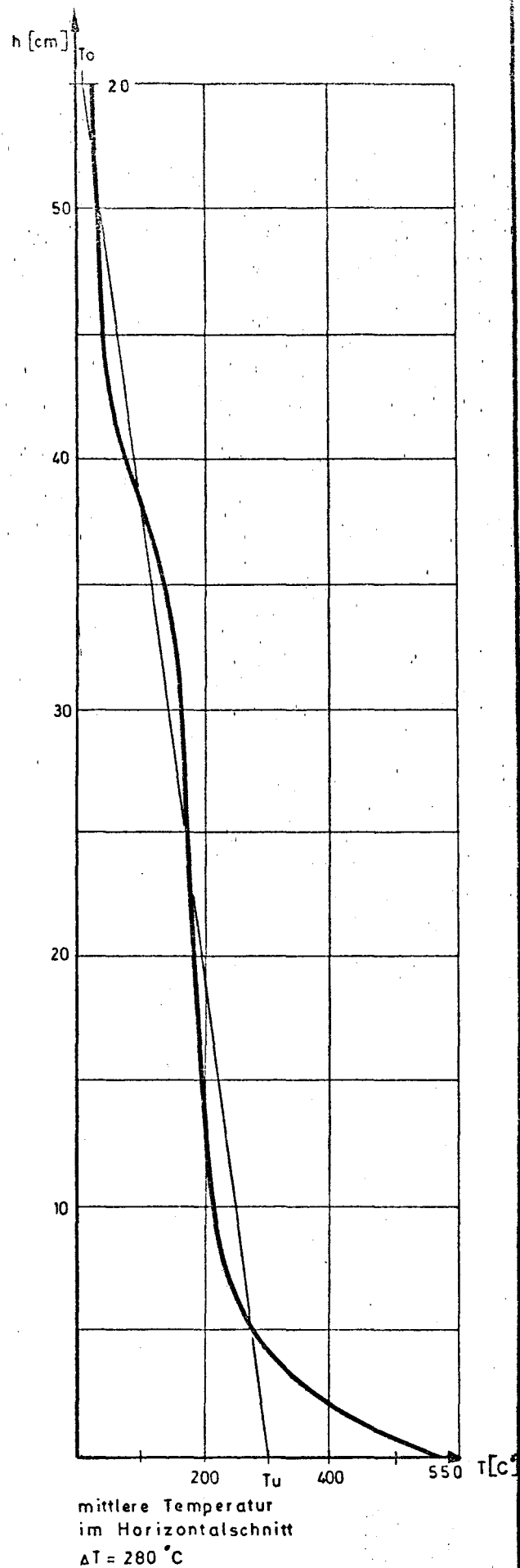
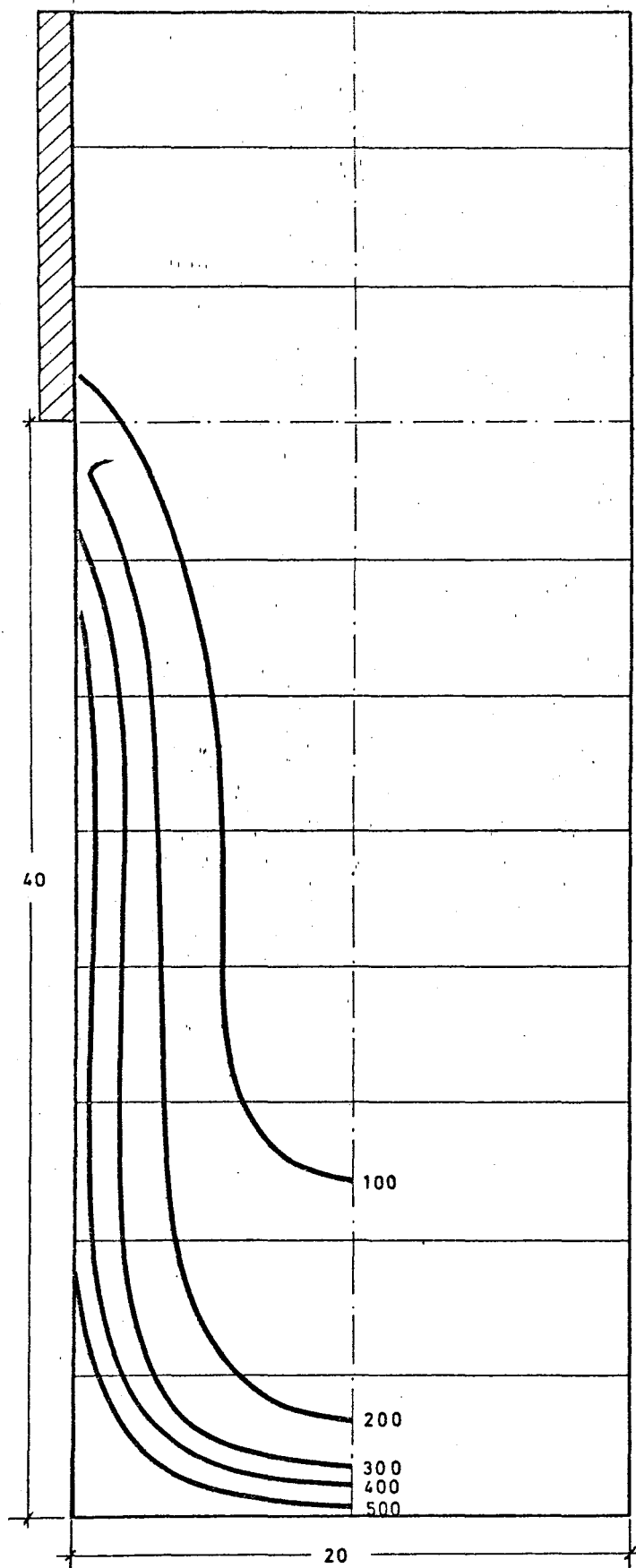
Anlage 6.6



Temperaturfeld Balken 4
Versagenszeitpunkt (91 Min.)

Anlage 6.7

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

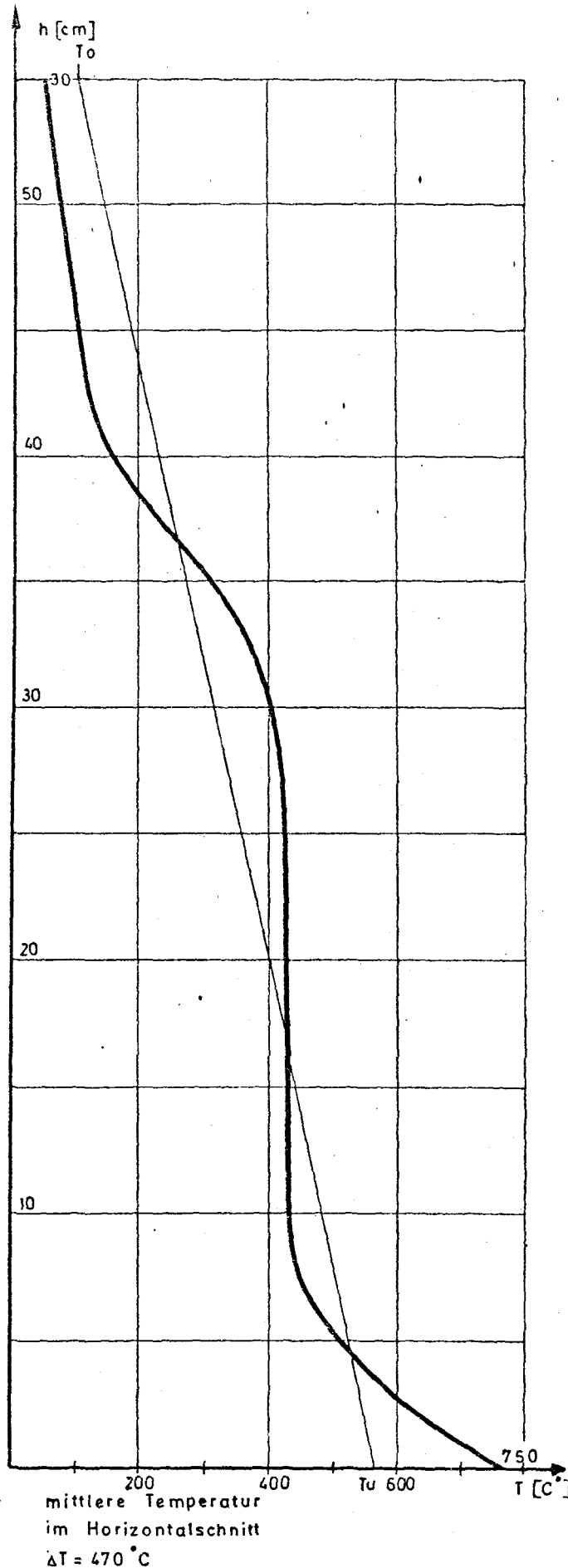
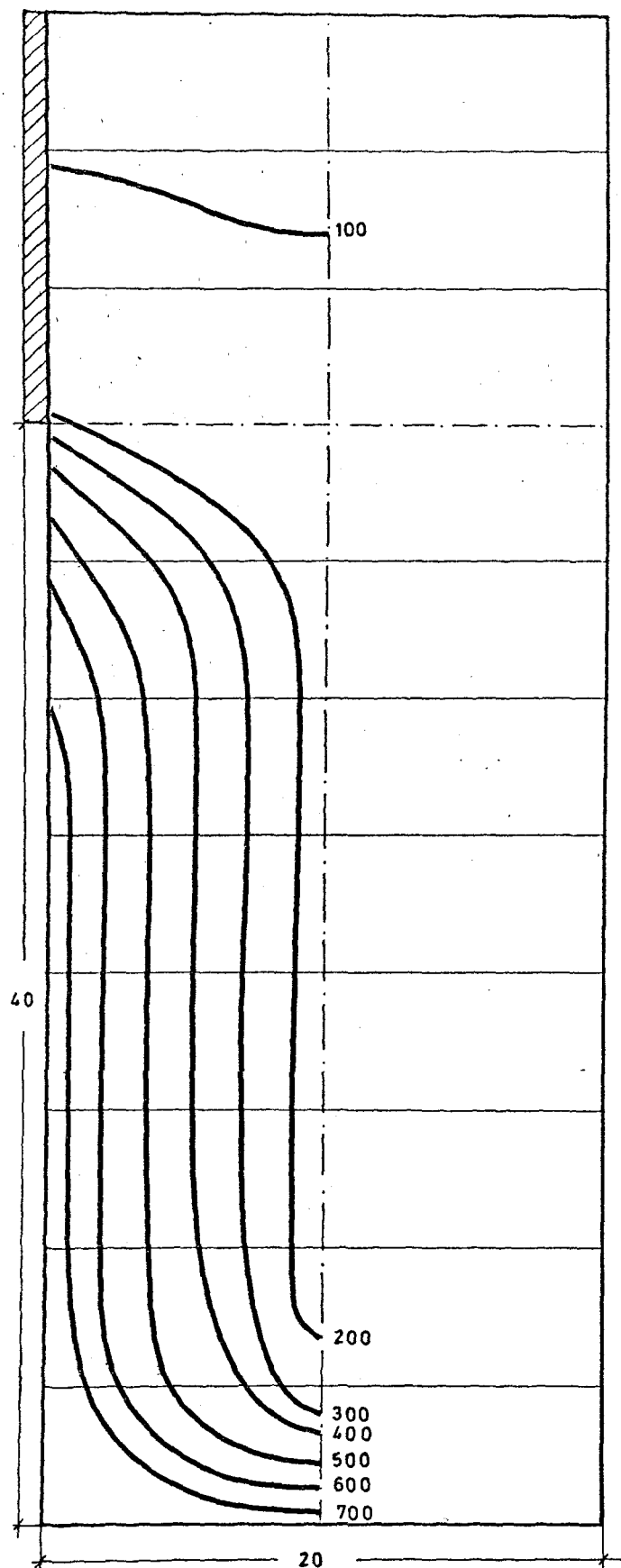


Temperaturfeld Balken 5,6
Beanspruchungsdauer 30 Minuten

Anlage 6.8

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

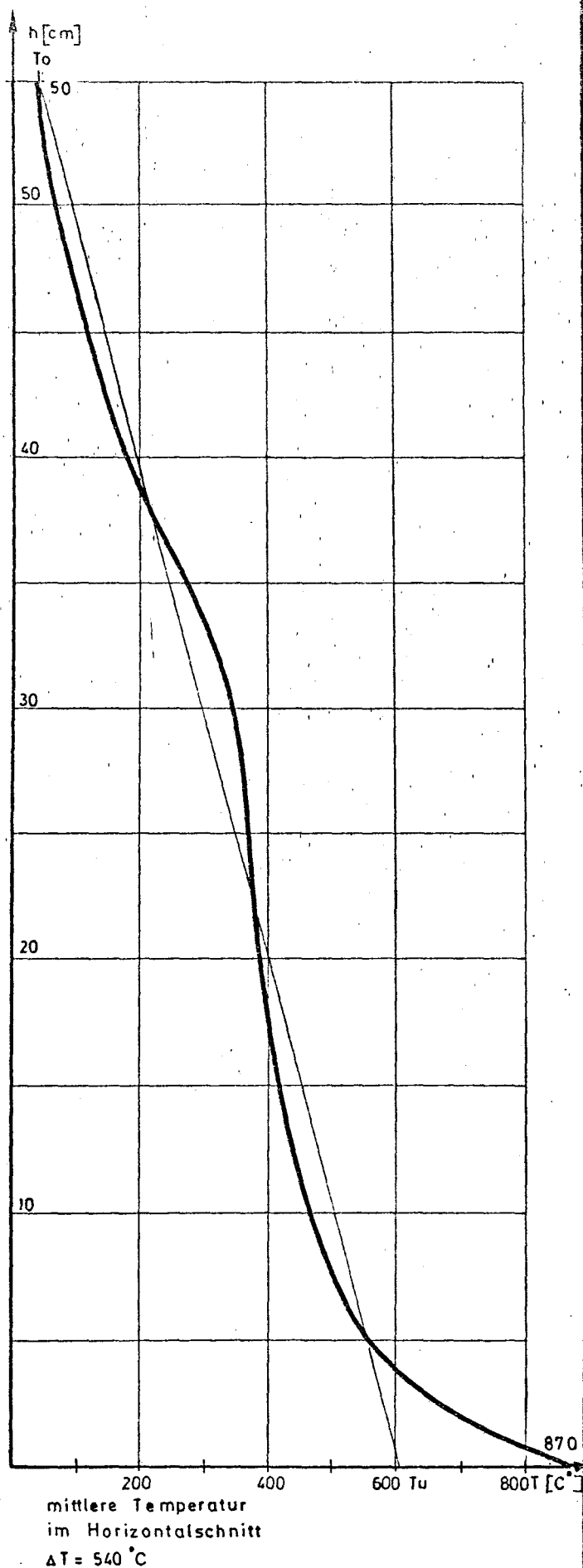
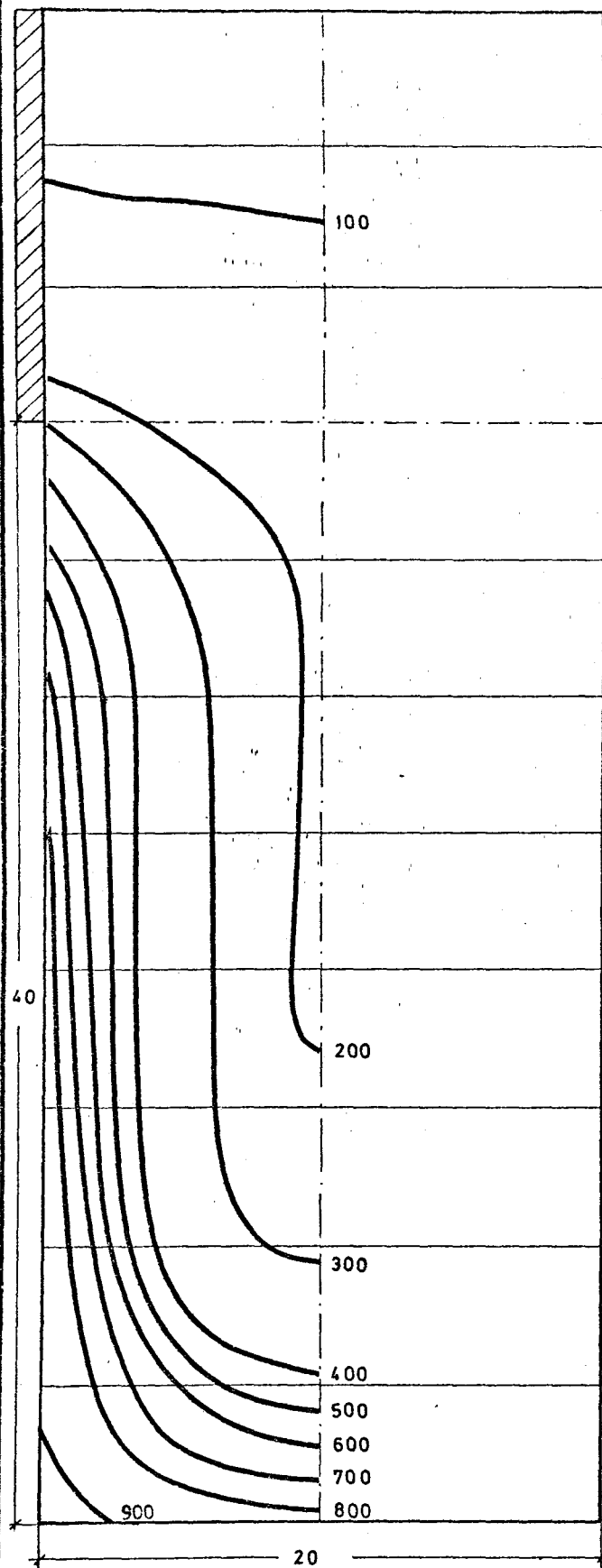
<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201905141322-0>



Temperaturfeld Balken 5,6
Beanspruchungsdauer 60 Minuten

Anlage 6.9

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen



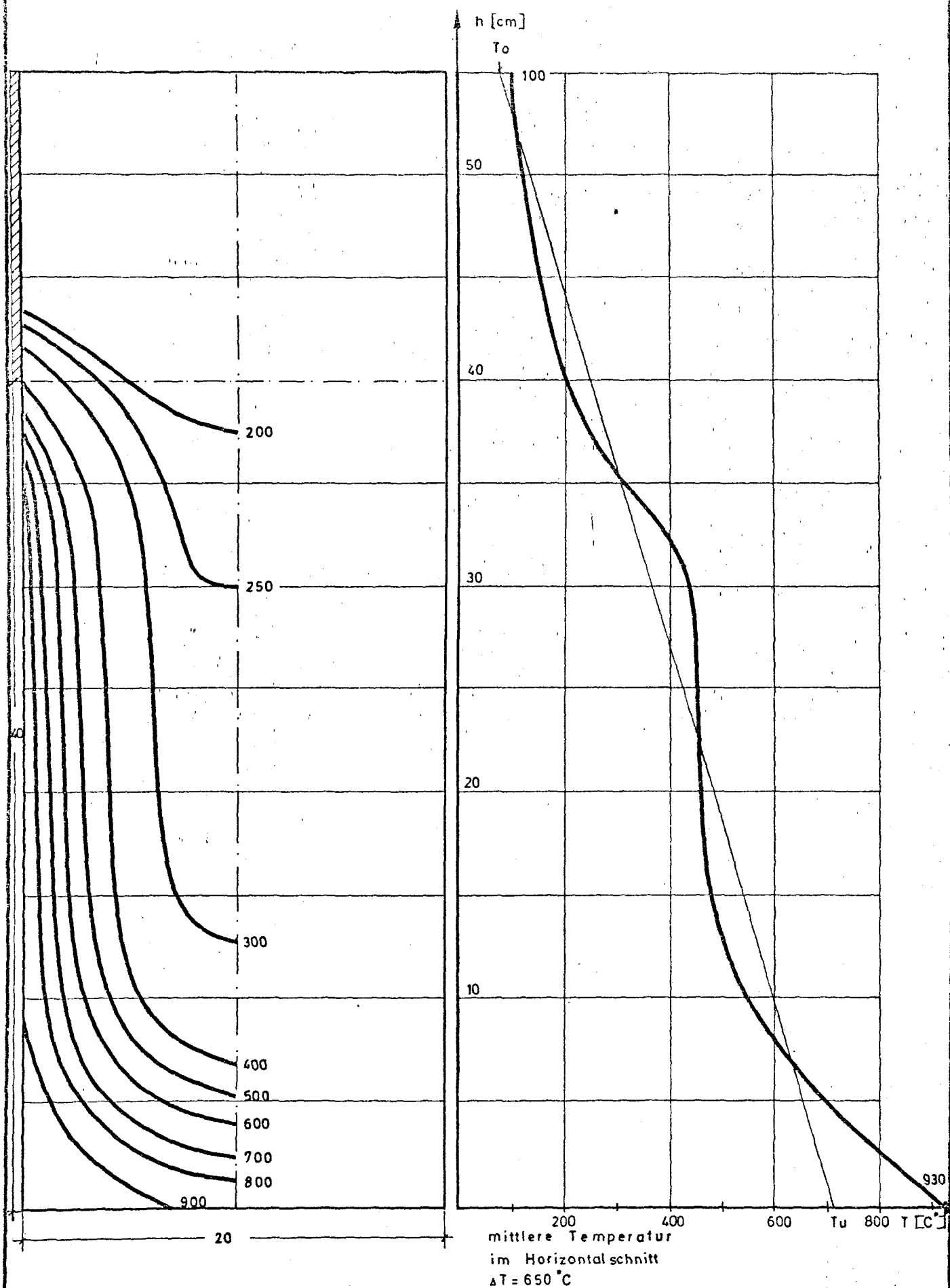
Temperaturfeld Balken 5, 6

Beanspruchungsdauer 90 Minuten

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig

Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 6.10

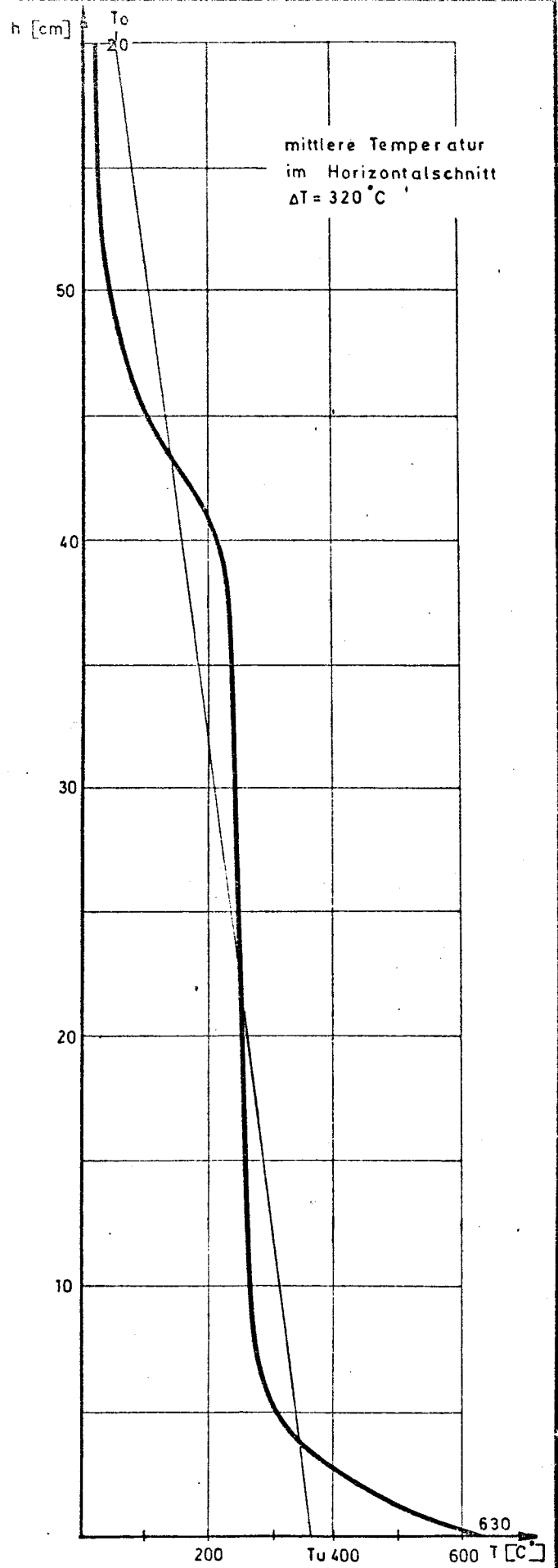
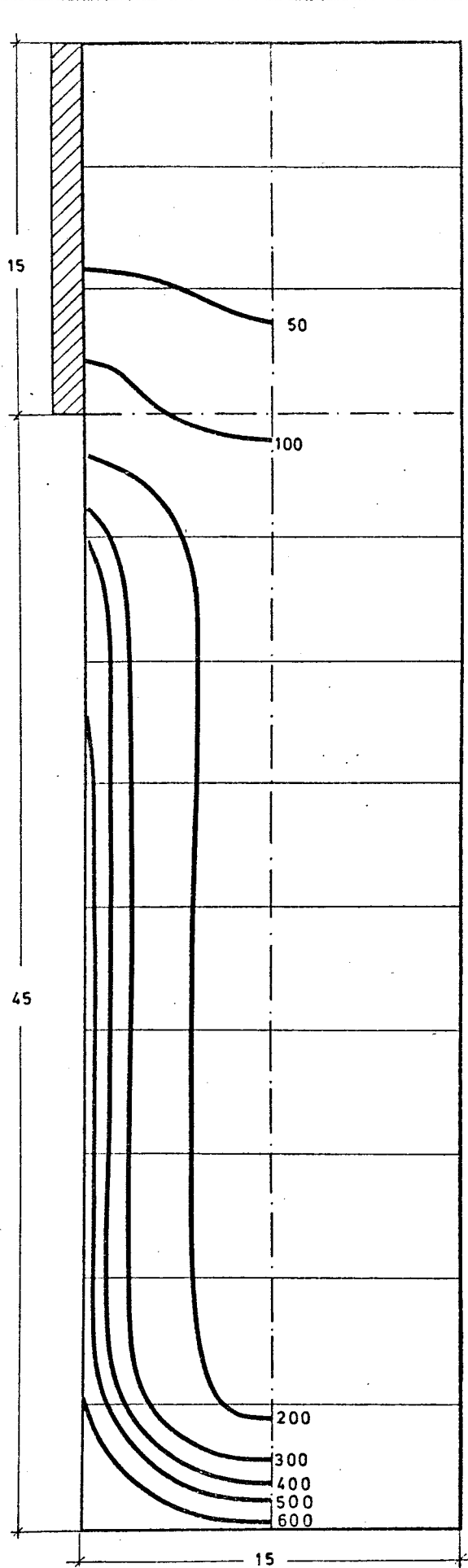


Temperaturfeld Balken 5
Versagenszeitpunkt (108 Min.)

Anlage 6.11

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

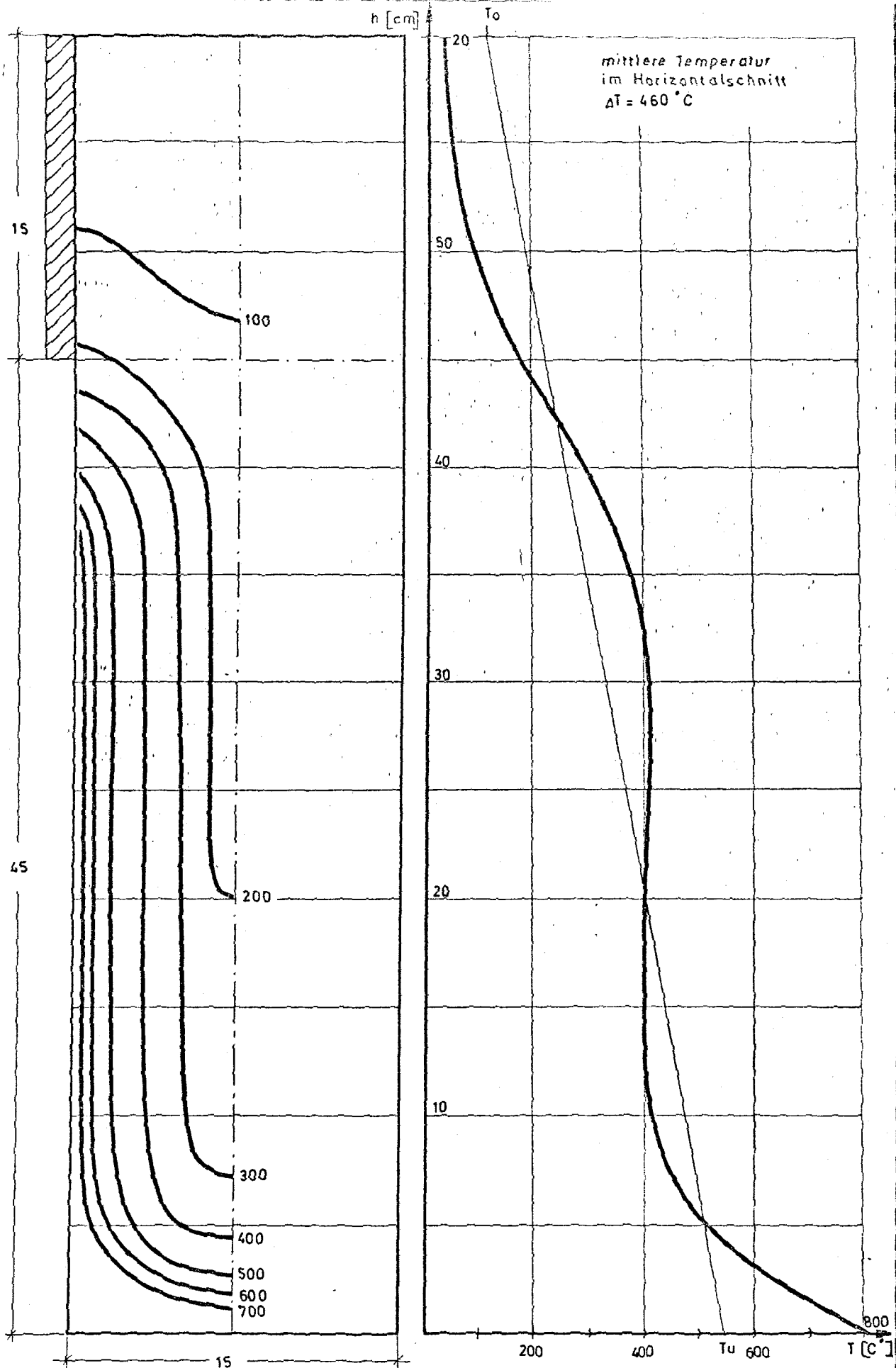
<https://doi.org/10.24355/dbbs.084-201905141322-0>



Temperaturfeld Balken 11
Beanspruchungsdauer 30 Minuten

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen

Anlage 6.12



Temperaturfeld Balken 11
Beanspruchungsdauer 60 Minuten

Anlage 6.13

Institut für Baustoffkunde und Stahlbetonbau
Technische Universität Braunschweig
Amtliche Materialprüfanstalt für das Bauwesen